



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la
Recherche Scientifique
Université Larbi Tébessi - Tébessa
Faculté des Sciences Exactes et des Sciences de
La Nature et de la Vie
Département des Sciences de la Terre et de l'Univers



MEMOIRE DE MASTER

Domaine: Sciences de la Terre et de l'Univers

Filière: Géologie

Option: Géologie de l'ingénieur et Géotechnique

Thème:

Prospection géophysique par gravimétrie et par résistivité et par polarisation provoquée : Cas des secteurs d'El Fedj et de Oum Sbâa (Boukhadra, Tébessa).

Présenté par:

ALLOUANI Mohamed Riadh

SOUALHIA Islem Eddine

Devant le jury:

Abd Rahmen BOUMAZBEUR

Professeur

ULT- Tébessa

Président

Djamel BOUBAYA

Professeur

ULT- Tébessa

Encadrant

Amor DEGAICHIA

MCB

ULT- Tébessa

Co-encadrant

Chams eddine FAHDI

Professeur

ULT- Tébessa

Examineur

Date de soutenance: 13/06/2022

ملخص

أجري هذا المسح الجيولوجي والجيوفيزيائي في موقعي الفدج وأم سباع جنوب بوخضرة. وقدمت خريطة جيولوجية تخطيطية تغطي كلا الموقعين.

وتبين الدراسة الجيوفيزيائية الإقليمية أن الموقعين اللذين شملهما المسح يعانيان من شذوذ إيجابي في قياس الجاذبية (قياس الجاذبية الثقيل). تم إجراء الدراسة الجيوفيزيائية التفصيلية عن طريق التنقيب الكهربائي والاستقطاب المستحث بواسطة: (1) جهاز التدرج، (2) الجهاز المتماثل، (3) التنميط الكهربائي المشترك و (4) السبر الكهربائي الرأسي. ومكنت الدراسة التفصيلية من إبراز المناطق المحتملة (المعدنية) في كلا الموقعين.

الكلمات المفتاحية:

السبر الكهربائي العمودي، الترياس/الطباشيري، التنميط الكهربائي المشترك، الفدج، أم السبع، جهاز متماثل، شذوذ الجاذبية.

ABSTRACT

This geological and geophysical survey was conducted at the El Fedj and Oum Sbaa sites south of Boukhadra. It provided a schematic geological map covering both sites.

The regional geophysical study shows that the two surveyed sites are located on a positive gravimetric anomaly (heavy gravimetric). The Electrical Prospecting and Induced Polarization (PP) retail geophysical study was conducted by: (1) Gradient Device, (2) Symmetric Device, (3) Combined Electrical Profiling and (4) Vertical Electrical Sounding (SEV). The detailed study made it possible to highlight prospective (mineralized) areas on both sites.

Keywords:

Vertical Electrical Sounding (SEV), Triassic/Cretaceous, Combined Electrical Profiling, El Fedj, Oum Sbaa, Symmetric Device, Gravimetric Anomaly

RESUME

La présente étude géologique et géophysique à été réalisée sur les sites d'El Fedj et Oum Sbaa au Sud de Boukhadra. Elle a permis de dresser une carte géologique schématique englobant les deux sites.

L'étude géophysique à caractère régional montre que les deux sites prospectés sont situés sur une anomalie gravimétrique positive (lourd gravimétrique). L'étude géophysique de détail par prospection électrique et polarisation provoquée (PP) a été réalisée par : (1) le dispositif gradient, (2) le dispositif symétrique, (3) le profilement électrique combiné et (4) le sondage électrique vertical (SEV). L'étude de détail a permis de mettre en évidence des zones prespectives (minéralisées) sur les deux sites.

Les mots clés :

Sondage électrique vertical (SEV), Trias/Crétacé, Profilement électrique combiné, El Fedj, Oum Sbaa, dispositif symetrique, anomalie gravimétrique.

DEDICACES

Avec joie, fierté et respect, je dédie ce mémoire :

Accompagné d'un profond amour à mes chers parents, pour tous leurs sacrifices, leur amour, leur soutien
et tout au long de mes études,

À mon frère Ahmed Amine et j'exprime mes profonds sentiments

À ma grande mère,

À toute la famille ALLOUANI,

À toute la famille BOUCHOUCHA,

À toute la famille SOUALHIA,

Je ne saurai terminer sans citer mes très chères amies : AYMEN H, BADR EDDINE, ABD EL HAMIDE,
HAITHEM et KHELED, et toute mes amies de mon quartier,

Que dieu préserve notre amitié.

Mercie d'être toujours là pour moi,

À tous qui m'aidé au long de mon parcours universitaire,

À mon binôme ISLEM « mon bras droit », c'était mon proche amie, mon frère, mon appuie au cours de
mes années universitaires et au long de notre travail sur notre mémoire de fin d'études

Que dieu le protéger.

Et je dédie mes amies universitaires : <<BOUKHECHEM CHAOUKI, BOUALI DJABRE, SAHOU
IBRAHIM >>. Que **DIEU** leur fasse miséricorde.

Enfin je le dédie à tous mes amis que n'ai pas cités et à tous ceux qui ma connaissent,

À tous les étudiants de Géoscience,

À toute la promotion 2021 – 2022.

Mohamed Riadh ALLOUANI

DEDICACES

Avec joie, fierté et respect, je dédie ce mémoire :

Accompagné d'un profond amour à mes chers parents, pour tous leurs sacrifices, leur soutien et tout au long de mes études,

À mes frères Djallel et Ala et je leurs exprime mes profonds sentiments

À toute la famille MENASRIA,

À toute la famille SOUALHIA,

À toute la famille ALLOUANI,

Je ne saurai terminer sans citer mes très chères cousin et amies : ABD EL HAMIDE, HAKOU, BADIS, BILEL, et toute mes amies de mon ville MORSOTT, que dieu préserve notre amitié.

Mercie d'être toujours là pour moi.

À tous qui m'aidé au long de mon parcours universitaire,

À mon binôme RIADH « mon bras droit », c'était mon proche amie, mon frère, mon appuie au cours de mes années universitaires et au long de notre travail sur notre mémoire de fin d'études

Que dieu le protéger.

Et je dédie mes amies universitaires : <<BOUKHECHEM CHAOUKI , BOUALI DJABRE ,SAHOUI IBRAHIM >>.Que **DIEU** leur fasse miséricorde.

Enfin je le dédie à tous mes amis que n'ai pas cités et a tous ceux qui ma connaissent,

À tous les étudiants de Géoscience,

À toute la promotion 2021 – 2022.

Islem Eddine SOUALHIA

REMERCIEMENTS

On remercie **DIEU** le tout puissant de nous avoir donné la santé et la volonté d'entamer et de terminer ce mémoire.

Tout d'abord, ce travail ne serait pas aussi riche et n'aurait pas pu avoir le jour sans l'aide et l'encadrement de **Mr. D. BOUBAYA** et **Mr. A. DEGAICHIA** malgré leurs charges académiques et professionnelles. Leur compétence et leur encadrement ont toujours suscité notre profond respect.

On offre de sincères et chaleureux remerciements à **Mr. D. BOUBAYA** pour la qualité de son encadrement exceptionnel, pour sa patience, sa rigueur, son appui et sa disponibilité durant notre préparation de ce mémoire.

Nos profondes gratitude s'orientent vers **Mr. A. DEGAICHIA** pour ces judicieux conseils qui ont contribué à alimenter nos réflexions et son support permanent, pour le temps qu'il a consacré et pour les précieuses informations qu'il nous a prodiguées avec intérêt et compréhension.

On exprime nos sincères remerciements aux membres du jury qui ont accepté de juger ce travail.

Nos remerciements s'adressent également à tous nos enseignants du département des sciences de la Terre, qui nous ont fourni les outils nécessaires à la réussite de nos études universitaires.

On tient à remercier toutes les personnes qui nous ont aidé de proche ou de loin dans l'élaboration de ce mémoire, et qui nous ont apporté leur appui moral et intellectuel tout au long de nos démarches.

TABLE DES MATIERES

ملخص	2
ABSTRACT	3
RESUME	4
DEDICACES	5
DEDICACES	6
REMERCIEMENTS	7
TABLE DES MATIÈRES	8
LISTE DES FIGURES.....	11
CHAPITRE I :	12
INTRODUCTION GENERALE.....	12
I. ORIGINALITE ET BUT DE L'ETUDE	13
II. CADRE GEOGRAPHIQUE.....	13
CHAPITRE II:	15
GEOLOGIE REGIONALE ET LOCALE.....	15
I. INTRODUCTION	16
II. STRATIGRAPHIE DE BOUKHADRA	16
A. Le Quaternaire récent.....	16
B. Le Quaternaire ancien	17
C. Le Miocène inférieur	17
D. Le Maastrichtien.....	17
1. Le Danien-Maastrichtien sup.....	17
2. Le Maastrichtien moyen.....	18
3. Le Maastrichtien inférieur	18
E. Le Campanien.....	18
F. Le Santonien	18
G. Le Coniacien	18
H. Le Turonien	19
I. Le Cénomaniens	19
1. Le Cénomaniens supérieur (sommets).....	19
2. Le Cénomaniens supérieur (base)	19
3. Le Cénomaniens moyen.....	19
4. Le Cénomaniens inf et Vraconien.....	20
J. L'Albien.....	20
1. L'Albien supérieur.....	20
2. L'Albien moyen.....	20
3. L'Albien inférieur	21
K. Le Clansayensien	21
L. L'Aptien	21
1. Le Faciès normal	21
2. Les Calcaires massifs lenticulaires.....	21

M. Le Trias.....	22
III. <i>ROCHES ÉRUPTIVES</i>	24
IV. <i>INDICATIONS LOCALES</i>	24
V. <i>TECTONIQUE</i>	25
VI. <i>MINÉRAIS ET SUBSTANCES UTILES</i>	26
VII. <i>RÉGIME DES EAUX</i>	26
CHAPITRE III :	27
THÉORIE DES MÉTHODES GÉOPHYSIQUES UTILISÉES	27
I. <i>INTRODUCTION</i>	28
II. <i>LEVE GRAVIMÉTRIQUE</i>	28
A. Introduction	28
B. Corrections et anomalies gravimétriques	29
1. Correction et anomalie à l'air libre	29
2. Correction et anomalie de Bouguer	30
C. En résumé	30
III. <i>LA PROSPECTION ÉLECTRIQUE:</i>	31
A. Introduction	31
B. Principe.....	31
C. Résistance et résistivité	33
D. Résistivité des roches	34
E. Sondage électrique vertical.....	36
F. La tomographie électrique.....	37
1. Acquisition des données de tomographie électrique 2D.....	38
IV. <i>La polarisation provoquée</i>	39
A. Introduction	39
B. Les paramètres mesurées en PP.....	42
1. Mesures dans le domaine temporel	42
2. Mesures dans le domaine spectral	44
C. L'origine des signaux mesurés en PP	47
1. Polarisation d'électrode	47
2. Polarisation de la double couche électrique.....	48
3. Polarisation de membrane.....	49
4. Polarisation d'interface.....	50
D. Les applications de la méthode de polarisation provoquée.....	51
CHAPITRE IV : METHODOLOGIE.....	53
D'ACQUISITIONS DES DONNEES.....	53
GÉOPHYSIQUES.....	53
I. <i>Introduction</i>	54
II. <i>TRAVAUX GÉOPHYSIQUES ANTERIEURS</i>	54
III. <i>Leve gravimétrique de la région</i>	54
A. Description du levé gravimétrique	54
IV. <i>Methodologie d'acquisition des données électriques</i>	55
A. Traitement des sondages électriques	57
CHAPITRE V : RESULTATS ET INTERPRETATIONS DES DONNEES GÉOPHYSIQUES.....	59
I. <i>INTRODUCTION</i>	60
II. <i>ETUDE GRAVIMÉTRIQUE DE LA RÉGION DE BOU KHADRA</i>	60
A. Carte de l'anomalie de Bouguer	60
B. Analyse de la carte d'anomalie résiduelle.....	62
I. <i>ETUDE GÉOPHYSIQUE D'EL FEDJ</i>	63
A. Le levé de profillement symétrique (El Fedj).....	63

B.	Le leve électrique gradient Moyen (GM-PP) d'El Fedj.....	64
C.	Le sondage électrique verticaux-polarisation provoquée El Fedj	65
D.	Le profillement électrique combiné (PEC-PP) El Fedj.....	66
II.	<i>ETUDE GEOPHYSIQUE D'OUM SBAA</i>	67
A.	Le leve de profillement symétrique (PES) d'Oum Sbaa.....	67
B.	Le leve de électrique gradient Moyen (GM-PP) d'Oum Sbaa	68
C.	Le sondage électrique vertical-polarisation provoquée d'Oum Sbaa.....	70
D.	Le profillement électrique combiné (PEC-Res) Oum Sbaa.....	70
CONCLUSION GENERAL ET RECOMENDATIONS		72
BIBLIOGRAPHIE		73
ANNEXE		77

LISTE DES FIGURES

Figure II-1:localisation de la zone d'étude D'O Sbaa et EL FEDJ (Bou Khadra). (Google earth 2021).....	14
Figure II-1 : Carte geologique de Bou khadhra numérisé par la carte géologique de Bou Khadra 1/50.000.	23
Figure III-1: Dispositifs, Wenner, Schlumberger et dipole-dipole	33
Figure III-2: Résistivités de quelques roches (d'après Florsch and Muhlach, 2018).....	35
Figure III-3:Echelle de résistivité électrique de différents sols.....	36
Figure III-4:Effet du sondage électrique dans la méthode SEV, d'après Shein et al. 2018.	37
Figure III-5: Arrangement des électrodes pour une acquisition 2D et séquence de mesure pour le dispositif Wenner (D'après Florsch and Muhlach, 2018).	39
Figure IV-1 : Forme du courant : mode TX-RX Multi-électrodes domaine de temps.	40
Figure IV-2: Phénomène de décharge	40
Figure IV-3 : Comparaison des courbes de décharge pour la PP et pour un circuit RC.	41
Figure IV-4: Le courant injecté en Polarisation Provoqué Temporelle (en haut), et le potentiel enregistré (en bas), dans un milieu polarisable (en rouge), et un milieu non polarisable (en noir).	43
Figure IV-5: Le principe des mesures de chargeabilité partielle à partir de la courbe de décroissance (dessin d'après le manuel du Syscal Pro).	44
Figure IV-6: Les signaux injecté et mesuré en Polarisation Provoqué fréquentielle.	45
Figure IV-7: Représentation schématique de la double couche électrique construit auteur d'un grain isolant (dessin d'après Revil et Florsch (2010)).	49
Figure IV-8: Polarisation d'interface (effet M-W) dans un sol ; (A) alignement des charges associées à l'interface solide-liquide sous l'influence d'un champ électrique externe ; (B) l'accumulation des charges à l'interface liquide-air. Extrait de Chen et Or (2006).....	51
Figure IV-1: exemple de traitement et interprétation des données de (SEV 08) d'El Fedj.	58
Figure II-1 : Carte de l'Anomalie de Bouguer de la région de Bou Khadra, les deux cadres indique la région d'étude.	61
Figure II-2: Carte de l'Anomalie de résiduelle de la région de Bou Khadra, les deux cadres indique la région d'étude.	63
FigureIII-1 : carte de resistivite du dispositif symetrique d'elfedj.	64
Figure III-2: carte de resistivite du dispositif gradient d'El Fedj	65
FigureIII-3 : coupe de sondage électrique vertical PP El Fedj.....	66
Figure III-4 : coupe de profilement électrique combiné (PEC-PP) El Fedj.....	67
Figure IV-1 : carte de resistivite du dispositif symetrique d'Oum Sbaa.	68
Figure IV-2: Carte de résistivité du dipositif gradient d'Oum Sbaa.	69
Figure IV-3: coupe de sondage électrique vertical PP Oum Sbaa.....	70
Figure IV-4: Le profilement électrique combiné (PEC-Res) Oum Sbaa.	71

**CHAPITRE I :
INTRODUCTION GENERALE**

CHAPITRE I: INTRODUCTION GENERALE

I. ORIGINALITE ET BUT DE L'ETUDE

Ce mémoire présente les résultats des études géologiques et géophysiques réalisées dans les deux régions " OUM SBAA – EL FEDJ" (Boukhadra;Tébessa). Situées appartient à l'Atlas saharien dans l'Est Algérien. L'unité de BOUKHADRA se trouve à une altitude de 850 m, le point culminant du Djebel est de 1463 mètres. La ville de BOUKHADRA fait partie de la wilaya de Tébessa.

Les travaux géophysiques projetés ont pour but :

- La recherche de la minéralisation polymétallique en profondeur (Pb, Zn).
- La cartographie géologique des variétés lithologiques.
- La détermination par les méthodes électriques gradient et SEV de la position et l'extension du contact Trias/Crétacé sous la couverture quaternaire et les possibilités de présence de minéralisation en profondeur.
- Détermination des paramètres de la structure contrôlant la minéralisation par la méthode PEC-PP
- Vérification de la présence de la minéralisation plombo-zincifère en profondeur.

II. CADRE GEOGRAPHIQUE

La région de BOUKHADRA appartient à l'Atlas saharien dans l'Est Algérien. L'unité de BOUKHADRA se trouve à une altitude de 850 m, le point culminant du Djebel est de 1463 mètres. La ville de BOUKHADRA fait partie de la wilaya de Tébessa.

Elle se situe à 45 Km au Nord – Est de celle -ci, à 200 Km au sud de la ville côtière de Annaba, et à 18 Km de la frontière Tunisienne.Elle est reliée à Annaba par une voie ferrée qui assure le transport du minerai de fer au complexe d'El-Hadjar. Le climat est continental et sec, les températures varient entre plus de 40° c en été et vont jusqu'à 0° c en hiver, la pluviométrie est faible avec parfois de faibles chutes de neige.

Elle se situe à 45 Km au Nord – Est de celle -ci, à 200 Km au sud de la ville côtière de Annaba, et à 18 Km de la frontière Tunisienne.Elle est reliée à Annaba par une voie ferrée qui assure le transport du minerai de fer au complexe d'El-Hadjar. Le climat est continental et sec, les températures varient entre plus de 40° c en été et vont jusqu'à 0° c en hiver, la pluviométrie est faible avec parfois de faibles chutes de neige.



Figure II-1:localisation de la zone d'étude D'O Sbaa et EL FEDJ (Bou Khadra). (Google earth 2021).

**CHAPITRE II:
GEOLOGIE REGIONALE ET LOCALE**

CHAPITRE II: GEOLOGIE REGIONALE ET LOCALE

I. INTRODUCTION

De grands plissements d'axe NE-SW d'une part des mouvements du socle de l'autre, sont les facteurs essentiels de l'aspect géologique de la région représentée sur la carte au 50.000^e "Bou Khadra".

De larges couloirs naturels, correspondant aux zones effondrées, s'ouvrent ainsi au travers des reliefs anticlinaux ou synclinaux, soulignés par les calcaires les plus durs de la série Crétacée (Aptien Turonien...).

La structure générale de la région est ainsi dessinée : aux cyclinaux prechés de l'Houd el sghir et de l'Houd el kebir et aux anticlinaux de Bou Khadra et de Def, s'opposent les plaines d'effondrement de morsott et des Ouled Bou Rhanem, cette dernière étant dominée par les calcaires aptiens du Bou Jaber, relevés dans un horst. (G. Dubourdieu, 1952).

II. STRATIGRAPHIE DE BOUKHADRA

A. Le Quaternaire récent

Il est composé de cailloutis résultant de la démolition de formations détritiques antérieures. Localement (cours supérieur de l'O bou sbaa), deux niveaux ont été distingués : à 3 ou 4m et à 6 m environ au-dessus du lit actuel de l'oued. Les cailloutis récents souvent difficiles à distinguer de la terrasse.

La croûte principale (50 à 80 cm d'épaisseur) qui compose le Quaternaire récent correspond à un ancien dépôt superficiel, dû à l'évaporation d'eaux chargées de calcaire. Elle est largement représentée dans toute la plaine d'El Meridj.

Les vieilles nappes d'épandage sont constituée de blocs éboulés de taille très variable et d'autant plus roulés que l'on s'éloigne des massifs, à une grande extension dans la région envisagée.

Dans les environs du Bou Khadra et de l'Haoud es Sghir, elle se transforme, par cimentation calcaire, en conglomérat, tandis que dans l'Est de la région (Kalaat es Senam) ses éléments sont libres.

Au Garet el Hamdane, sous le conglomérat calcaire, apparaît un poudingue à ciment grossier calcaréo-gréseux, qui se prolonge loin vers le Nord et passe dans la région représentée sur la carte du l'Ouenza.

Les cailloutis anciens sont surtout des petits galets de calcaires à Inocérames, qui se développent à la base des blocs dans les environs l'O. el Ma.

Les calcaires lacustres sont des quelques petits lambeaux calcaires, à l'Est du Dj. Def, sont les derniers représentants vers le Sud des formations lacustres de la région de l'Ouenza. Limons anciens de couleur

ocre-rosée et peu épais, ils apparaissent localement sous les formations de croûte principale ou des vieilles nappes d'épandage dans l'Est de la région représentée sur la carte (O. Horihir O. el Ma...). (A. Degaichia,).

B. Le Quaternaire ancien

Deux carapaces calcaires de 30 à 60 cm (croûte principale et calcaire lacustre), séparées par des lits de galets ou cailloutis épais de quelques mètres de cailloutis anciens et par des limons ocre-rosés, se voient dans les environs de l'O, el Ma, principalement, sous les formations quaternaires précédentes.

La distinction des diverses couches inférieures à la croûte principale est très difficile à faire à cause de leur discontinuité et de l'absence très fréquente de l'une ou l'autre d'entre elles ; il faudra donc n'utiliser les données de la carte qu'avec la plus grande réserve et ne les tenir que pour des indications très approximatives.

Le Quaternaire ancien est constitué d'éléments très roulés, emballés dans une pâte gréseuse, qui s'observent souvent avec un certain pendage et sont dus à un alluvionnement datant probablement du Pliocène (poudingues anciens des O. Horihir et O. El Ma).

Dans l'entablement calcaire du Fretissa, on rencontre des blocs de calcaires à Nummulites de dimensions énormes résultant de l'éboulement d'une corniche éocène, aujourd'hui disparue.

C. Le Miocène inférieur

Il n'est représenté que très localement à l'Ouest du Dj. Bou Khadra, où il est transgressif sur le Cénomaniens et le Turonien (Koudiat el Hamra). En dehors d'un lambeau gréseux affleurant à 2 km au SW du Koudiat el Hamra, ce Miocène est composé de calcaires brun-jaunes, en général grossiers, à débris de Pectens et d'Huitres (*O. Crassissima* Lam). (G. Dubourdieu, 1952).

D. Le Maastrichtien

1. Le Danién-Maastrichtien sup.

Il s'agit ici d'une importante accumulation de marnes gris-noires, comprenant à leur base quelques minces intercalations d'un calcaire blanc-jaunâtre, dont seule la partie inférieure affleure dans la région représentée sur cette carte (flanc Ouest de la Table de Jugurtha). (G. Dubourdieu, 1952).

2. Le Maastrichtien moyen

D'une épaisseur voisine de 100 m (environs de Kalaat es Senam), cette formation est constituée de calcaires blancs, crayeux, à nombreuses empreintes d'Inocérames (*I. Regularis* d'Orb.); bien lités mais compacts à leur sommet, ces calcaires contiennent quelques minces intercalations marneuses à leur base. (G. Dubourdieu, 1952).

3. Le Maastrichtien inférieur

Des marnes gris-jaunes, contenant quelques minces bancs d'un calcaire blanc, crayeux, très tendre, sont marquées dans la topographie par une légère dépression. Ces marnes sont dépourvues de macrofaune, mais surmontent directement un niveau calcaire qui appartient à l'extrême base du Maastrichtien. Leur épaisseur est au synclinal de Kalaat es Senam de 135 m environ. (G. Dubourdieu, 1952).

E. Le Campanien

Des calcaires blancs, crayeux, à empreintes d'Inocérames, en bancs bien lités, et contenant des intercalations marneuses à leur base et à leur sommet, dessinent une ligne de relief au-dessus des marnes de l'Emschérien. Cette formation de 75 m environ a été reconnue à l'Est de la Table de Jugurtha par L. Pervinquière, qui a trouvé à son sommet *Bostrychoceras polyplocum* Ræmer, fossile caractéristique de la base du Maastrichtien Ma division, essentiellement lithologique, ne correspond donc déjà plus au Campanien à son sommet. (G. Dubourdieu, 1952).

F. Le Santonien

Une puissante accumulation de marnes gris-foncées, dont l'altération est souvent bleutée et qui comprend dans sa partie inférieure des calcaires argileux gris à patine jaune ou bleutée, en bancs de 1 m environ, constitue le sommet de l'Emschérien et probablement aussi, une partie du Campanien. D'une puissance de 600 m environ dans la région de l'O.el Ma, cette série est assez peu fossilifère. Seules de mauvaises empreintes d'ammonites sur les intercalations calcaires de base, permettent de la dater. En effet j'y ai reconnu, en plus de grands inocérames non déterminés, deux fragments d'ammonites que je rapporte à l'espèce *Texanites Texanus* Ræmer. (G. Dubourdieu, 1952).

G. Le Coniacien

Au-dessous des intercalations de calcaire de la série précédente et reposant sur le Turonien, des marnes gris-foncées, très argileuses, à altération bleutée, constituent le Coniacien. De temps en temps, un petit banc de calcaire très argileux gris, à patine bleue, vient interrompre la monotonie de cette série, dont

l'épaisseur est de 490 m dans la région de l'O. el Ma. Comme fossile, je ne peux citer ici que *Pycnodonta Vesicularis* Lam. (G. Dubourdieu, 1952).

H. Le Turonien

Cet étage est formé de barres assez puissantes (l'une d'elles atteint 20 m) d'un calcaire massif gris clair, très dur, alternant avec des marnes grises, en général assez calcaires, en couches de 1 à 10m d'épaisseur en moyenne. Compris entre les marnes de Emschérien et du Cénomanién, le Turonien dessine de remarquables corniches dans la topographie de la région (Haoud es Srrhir, Haoud el Kebir), où il atteint une puissance de 190 m environ. (G. Dubourdieu, 1952).

I. Le Cénomanién

1. Le Cénomanién supérieur (sommet)

Il est formé de petits bancs d'un calcaire assez argileux, gris-noir, de 30 à 60 cm d'épaisseur, alternent régulièrement, sur une hauteur de 73 m environ (Haoud es Srrhir), avec des marnes, le plus souvent très calcaires, de couleur gris-claire. (G. Dubourdieu, 1952).

2. Le Cénomanién supérieur (base)

Il est couronné à son sommet par une corniche de calcaire sublithographique noir à cassure tranchante (5 m) et, se poursuivant par des alternances de calcaires très argileux gris et de marnes dures (52 m), cette série est constituée dans sa partie inférieure par une succession régulière de petits bancs d'un calcaire très argileux noir, à patine jaune, séparés les uns des autres par des marnes assez argileuses, gris-claires, à altération jaunâtre, en couches d'une dizaine de mètres de puissance. L'ensemble de la formation atteint une épaisseur de 115 à 120 m.

Les seuls fossiles rencontrés se trouvent dans les marnes et calcaires inférieurs : *Lima* sp, *Alectryonia* sp, et, en très grande abondance, *Exogyra olisiponensis* Sh. (G. Dubourdieu, 1952).

3. Le Cénomanién moyen

Il composé des marnes gris-foncées qui prennent par altération une teinte vert-jaunâtre et qui contiennent d'innombrables plaquettes de calcite fibreuse, forment la partie essentielle du Cénomanién moyen. A la base de la formation et aussi en intercalations à divers niveaux, apparaissent de petits bancs d'un calcaire très argileux, gris-noir, à patine souvent jaunâtre ; si ces calcaires sont assez développés au Nord de la région (versant Sud du synclinal d'Ain Chénia), ils tendent à disparaître plus au Sud (région de l'O. Bou Sbaa), où leur place n'est bien souvent indiquée que par quelques rognons de calcaire argileux.

La faune de ce Cénomaniens est très pauvre : sur les plaquettes de calcite, des empreintes d'Oursins et quelquefois aussi de Lamellibranches ; auprès des intercalations calcaires de base, quelques Ammonites, parmi lesquelles : *Forbesiceras* sp, et *Acanthoceras (Calycoceras) jimboi* Perv. Au Sud de l'Haoud es Srhir, j'ai évalué à 480 m la puissance de ces couches. (G. Dubourdieu, 1952).

4. Le Cénomaniens inf et Vraconien

Cette série, qui atteint la puissance de 880 m à l'E-N-E du Bou Khadra, est composée des marnes verdâtres à plaquettes de calcite fibreuse très analogues à celles du Cénomaniens moyen avec quelques intercalations de calcaires très argileux gris, en petits bancs de 0,50 mètre environ. La faune comprend, au sommet, d'assez nombreux représentants de l'espèce *Mantelliceras martimpreyi* Coq, tandis que plus bas se trouve l'espèce *Turrilites bergeri* Brong. La coupure Albiens-Cénomaniens doit donc se placer vers le milieu de la formation dans laquelle j'ai également trouvé : *Sauvagesia nicaisei* Coq, *Nautilus elegans* Sow, *Turrilites tuberculatus* Bosc, *T. gravesianus* d'Orb et *Flickia simplex* Perv. (G. Dubourdieu, 1952).

J. L'Albiens

1. L'Albiens supérieur

Je rapporte au sommet de L'Albiens les marnes noir-foncées, à nombreuses petites passées de calcaire très argileux noir, qui avaient été attribuées à tort (feuille de L'Ouenza) au Cénomaniens inf. Contenant des empreintes très abimées de nombreuses ammonites, elles se continuent en Tunisie, où Pervinquière y a notamment reconnu cette faune caractérise les couches les plus supérieures de l'Albiens (zone à *Pervinquieria pricei*) qui atteignent ici (au N. du Dj. Bou Khadra) une épaisseur de 370 m environ. Il faut remarquer que la base de cet Albiens sup. devient suffisamment calcaire et dure pour donner dans la topographie une ligne de relief, qui dessine l'auréole périclinale N.E du Dj. Bou Khadra. (G.Dubourdieu, 1952).

2. L'Albiens moyen

Cette formation, dont le sommet est constitué par une barre importante (5 m) de calcaire noir sublithographique, est ensuite essentiellement formée d'alternances régulières de calcaires et de marnes noires, la série devenant plus argileuse et un peu microgréseuse à la base. L'ensemble atteint l'épaisseur de 175 m (Dj. Bou Khadra). Si l'on excepte les bélemnites des calcaires sup. (*B. minimus* Lister), les fossiles ne se trouvent guère que dans la moitié inférieure de ces niveaux, où j'ai reconnu : *Discoïdes conicus* Desor., *Desmoceras dupinianum* d'orb.var. *africana* Perv., *D. cf. revoilii* Perv., *Dowillei-ceras mammillatum* Schl. (G. Dubourdieu, 1952).

3. L'Albien inferieur

Daté surtout par sa position au-dessus du niveau de Clansayes, l'Albien inf. est représenté au Bou Khadra par des marnes grises à altération jaune, contenant quelques minces passées marno-calcaires souvent microgréseuses. A leur sommet, un banc de calcaire gréseux à patine rouille contient *Chlamys dutemplei* d'orb (environ 120 m). (G. Dubourdieu, 1952).

K. Le Clansayensien

Des calcaires gréseux à patine rouille (sommet de la formation), des calcaires noirs sublithographiques (milieu de la série) et des grès rouillés (à la base), séparés les uns des autres par des marnes très argileuses jaunes, correspondent à la zone de Clansayes, qui atteint 110 m au Dj. Bou Khadra. Une belle faune d'Ammonites, identique à celle du Dj. Ouenza où a été daté ce niveau, m'a permis, par comparaison, la détermination de l'âge de cette formation. (G. Dubourdieu, 1952).

L. L'Aptien

C'est aux calcaires durs de cet étage que sont dus les reliefs les plus vifs de la région (Bou Khadra, Bou Jaber), ou l'Aptien se présente sous deux aspects principaux :

1. Le Faciès normal

Il est surtout visible sur le flanc NW de Bou Khadra et se compose de calcaires francs ou plus ou moins gréseux à orbitolines et de grès à ciment calcaire, en bancs pouvant atteindre plusieurs mètres d'épaisseur, séparés par des marnes gris-claires. Les fossiles les plus caractéristiques de ce faciès sont, en plus des orbitolines, *Toxaster collegnoi* d'orb, et Ex. *latissima* Lam., mais, on y trouve également d'autres organismes, tels que *Discoides* sp, *Holactypus* sp, *Holaster* sp. *Tylostoma rochatianum* d'orb, *Neithea morrisoni* Pict, et Ren, *Alectryonia (Arctostrea) rectangularis* Remer, etc. Au Dj. Bou Khadra, ce faciès, au-dessus des calcaires massifs, a une puissance de 190 m environ. (G. Dubourdieu, 1952).

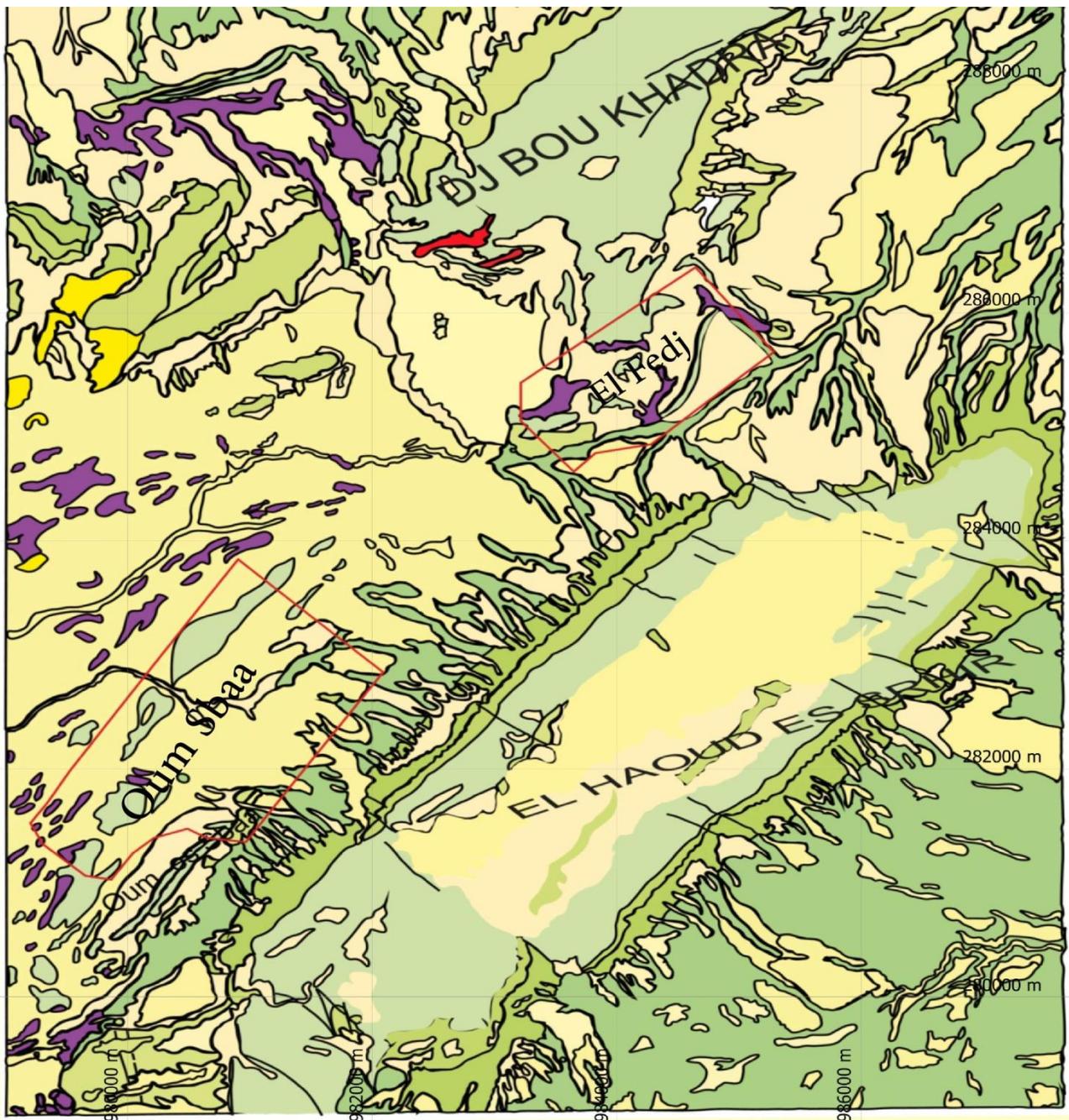
2. Les Calcaires massifs lenticulaires

Ils constituent une variation latérale du faciès précédent et sont formés d'une roche très dure, de couleur gris-claire en général, contenant des sections de polypiers et de rudistes. Au microscope, ces calcaires se montrent grumeleux et contiennent des pseudo-oolithes indiquant un remaniement en cours de sédimentation. On y trouve aussi de nombreux débris d'organismes: mèlobésiées, polypiers, échinodermes, brachiopodes et lamellibranches. Ces calcaires massifs forment la crête du Bou Jaber, et tout le sommet du Bou Khadra, où la lentille supérieure atteint une puissance de 175 m.

Indiquons encore qu'au Bou Khadra et au Bou Jaber, sous les masses de calcaires lenticulaires, s'observent des bancs assez réguliers d'un calcaire à débris de lamellibranches ou autres organismes, qui correspond à une sédimentation très troublée en eau peu profonde (sur la carte, ces bancs sont indiqués par le même figuré que celui des calcaires lenticulaires). Je ne connais pas la puissance totale de cet Aptien dont je n'ai pu observer la base, mais au Bou Khadra, sa partie visible semble atteindre une épaisseur voisine de 700 m. (G. Dubourdieu, 1952).

M. Le Trias

Il n'apparaît qu'en diapir dans la région et se présente toujours sous un aspect très chaotique. Des marnes bariolées à gypse (t) emballent divers éléments rocheux, dont les principaux sont : des dolomies grises à grain fin, assez souvent en brèches (td) ; des cargneules jaunâtres (tc) ; des grès verdâtres un peu micacés (tg). (G. Dubourdieu, 1952).



Légende de la carte géologique de Bou Khadra

Echelle: 1/50000

	Eboulis actuels		Cénomaniens moyen
	Limons actuels		Clansaynesien
	vieilles nappes d'épandage		Aptien
	Miocène inférieur		Trias
	Cénomaniens supérieur (sommets)		Fer
	Cénomaniens supérieur (base)		

Figure II-1 : Carte géologique de Bou khadhra numérisé par la carte géologique de Bou Khadra 1/50.000.

III. ROCES ÉRUPTIVES

Dans le Trias, un pointement d'une roche basique verte (E) est le seul représentant des formations éruptives dans la région (NW de l'Oum es Sbaa). (G. Dubourdiou, 1952).

IV. INDICATIONS LOCALES

Le Bou Khadra, qui constitue le point culminant de la région, est comme le Dj. Ouenza un anticlinal dont l'axe est orienté SW-NE. Les calcaires lenticulaires de l'Aptien, dominant de leur masse imposante le village de Bou Khadra, en forment le cœur et, il est auréolé au NE par les différents niveaux de l'Albien qui lui dessinent une très belle enveloppe périclinale. Il est coupé au SW par une zone de fractures d'effondrement, à laquelle est liée la mine de fer.

L'Haoud es Srhir est un grand synclinal perché, à corniche Turonienne. Zone d'effondrement située au SW du Bou Khadra. Se raccordant au fossé de Tébessa-Morsott, dont elle est un diverticule, la région comprise entre Bou Khadra et Haoud es Srhir est limitée par deux accidents : la zone de fracture SE-NW qui coupe le Bou Khadra et, une faille NE-SW (masquée par des accidents postérieurs liés au Trias) qui longe l'Haoud es Srhir. Cette zone effondrée, en forme de coin, qui a permis la conservation à une cote peu élevée de Turonien et de Miocène (Kat el Hamra), ou d'Emschérien (au S de l'Oum es Sba), est envahie, dans la moitié de sa surface, par du Trias diapyr, qui va donner localement de grandes complications tectoniques :

- le long de l'Haoud es Srhir, tout un paquet de terrain (Aptien et Cénomaniens) a été repoussé par le Trias dans son ascension, et forme une série d'affleurements anormaux, dont le plus caractéristique est celui de l'Oum es Sba (deux barres d'Aptien, redressées à la verticale, compriment tout le flanc de l'Haoud). La limite E de cet ensemble Crétacé, figurée sur la carte par de gros tirets, montre le bouleversement de cette zone ;

- au N et au NE du Koudiat el Hamra, l'injection Triasique a poussé une lame Aptienne (gare de Bou Khadra) qui est venue se plaquer contre les différentes assises de la couverture du Dj. Bou Khadra, les rebroussant ou les laminant.

- au col qui sépare le Bou Khadra de l'Haoud (passage de la piste d'EI Meridj), le contournement ahurissant d'une lame Aptienne est encore dû à cette tectonique du Trias.

Entre l'Haoud es Srhir et l'Haoud el Kebir, qui lui aussi est un synclinal perché de Turonien, et, contrastant avec ces deux reliefs, s'étale la vaste dépression des marnes Cénomaniennes occupée par l'O. Bou Sbaa, qui n'offre rien de bien particulier.

Au Nord du Bou Khadra, les marnes Cénomaniennes et Vraconiennes occupent une vaste surface et s'étendent jusqu'aux reliefs calcaires du Cénomaniens sup. d'Ain Chénia, qui dessinent alors l'extrémité N E d'un beau synclinal compris entre les Dj. Guelb et Bou Khadra, Cette région est coupée par un accident de direction NE-SW, très mal visible (région de l'O. el Harcha) qui me paraît imputable au Trias, probablement très peu profond.

La moitié Sud du Dj. Def (dôme Albien) et la zone Cénomaniennes des environs du Garet el Hamdane, n'offrent pas de difficultés.

Il faut, par contre, insister sur la plaine des Oulad Bou Rhanem, Cette région correspond à un fossé d'effondrement, qui se prolonge au N (feuille de l'Ouenza) entre Def et Hameima, où il est alors complètement recouvert par des formations continentales récentes. Sa faille bordière occidentale, qui passe à peu près à l'endroit où l'O. Horihir atteint la limite N de la région représentée sur la carte, se prolonge vers le SSE, où elle est jalonnée par le Bir Hamida, puis, après avoir été déjetée vers l'Ouest par un accident transversal, vient probablement mourir dans les environs de l'extrémité orientale du Bou Jaber - la limite E du fossé est en territoire Tunisien, en dehors des limites de cette carte. Affleurements Crétacés peu nombreux (Turonien ou Cénomaniens sup.). Par contre, le Trias diapir est important aux environs de l'O. el Ma, où sa mise en place paraît localement très récente.

Dj. Bou Jaber. C'est un anticlinal Aptien qui vient surgir au-dessus des marnes Cénomaniennes, contre lesquelles il bute par faille au S et à l'Ouest: son cœur est envahi par du Trias (bien visible dans les travaux de recherche) et son flanc N n'existe plus (faciès tendre de l'Aptien soulevé par le Trias, puis érodé). A son extrémité E, il s'interrompt brusquement contre le prolongement probable de la faille d'effondrement du fossé des Oulad Bou Rhanem. Il fait lui-même partie d'un horst, limité au S par la grande fracture qui longe le flanc méridional du massif et au N, par une faille de direction WSW-ENE qui se devine depuis l'O. Bou Sbaa (Faidja ech Cheikr) jusqu'à l'O. el Ma (NW de Kalaat es Senam).

Le synclinal de Kalaat es Senam, qui prend en écharpe l'angle SE de la région étudiée, comprend essentiellement les calcaires à Inocérames (Campanien et Maastrichtien) et, à la limite E de la carte, le début des marnes noires maastrichto-Daniennes. L'Eocène qui, dans les prolongements du synclinal, donne les splendides entablements du Dyr et de la Table de Jugurtha, n'apparaît pas. (G. Dubourdieu, 1952).

V. TECTONIQUE

Deux phases principales doivent être distinguées :

a- Les plissements de couverture, de direction NE-SW, qui donnent les grands axes anticlinaux et synclinaux de la région, et qui datent vraisemblablement de l'Eocène et plus récemment, de légers mouvements qui ont affecté le Miocène.

b - Une tectonique cassante, traduisant des mouvements du socle, à laquelle appartiennent les fossés de Tebessa-Morsott (SW du Bou Khadra) et des Oulad Bou Rhanem, et le horst du Bou Jaber. Cette deuxième phase tectonique est postérieure aux plissements précédents et doit être relativement récente. Je n'ai malheureusement pas d'éléments me permettant de la dater avec précision. (G. Dubourdieu, 1952).

VI. MINERAIS ET SUBSTANCES UTILES

1. Le Fer (Hématite) du Bou Khadra et celui qui apparaît à l'extrémité W du Bou Jaber résultent de l'oxydation de carbonates (sidérose) dus à une métasomatose des calcaires Aptiens.

2. Du Plomb (Galène) existe, au Bou Jaber principalement, mais aussi, en faible quantité, au Bou Khadra, en filonnets ou petites mouches dans les calcaires massifs de l'Aptien. Il est associé à de la Baryte.

3. Un bon matériau de construction est fourni par le calcaire Aptien. (G. Dubourdieu, 1952).

VII. RÉGIME DES EAUX

Les synclinaux calcaires sont des réservoirs naturels d'eau et, à leur pied, apparaissent des sources qui sont fréquemment localisées sur de petites fractures. L'on a ainsi les points d'eau d'Ain Chénia, à l'extrémité fracturée du synclinal du même nom, les sources d'Ain Safsaf, A. Malga, A. Chegaga, etc., au pied de l'Haoud es Srhir et celle d'A. Bettik, au pied de l'Haoud el Kebir. Au SE, l'A. O. el Ma est un exutoire de l'eau accumulée dans les calcaires à Inocérames du Sénonien.

Au Bou Khadra, d'anciens travaux de recherche ont recoupé des circulations d'eau dans les calcaires Aptiens (A. Sidi Hamed) et il en est de même au Bou Jaber, où des recherches exécutées en profondeur à l'extrémité Ouest du massif ont été noyées.

Dans la plaine des Oulad Bou Rhanem, le point d'eau du Bir Hamida, qui se trouve à peu près sur la faille bordière Ouest du fossé d'effondrement, est sans doute en rapport avec cet accident. (G. Dubourdieu, 1952).

**CHAPITRE III :
THÉORIE DES MÉTHODES GÉOPHYSIQUES
UTILISÉES**

CHAPITRE III : THÉORIE DES MÉTHODES GÉOPHYSIQUES UTILISÉES

I. INTRODUCTION

Dans ce chapitre sont donnés les principes théoriques des méthodes géophysiques utilisées dans cette étude. Il s'agit de la prospection par polarisation provoquée, la gravimétrie et les méthodes électriques à courant continu. et la gravimétrie ont été employés en mode reconnaissance. Alors que la prospection électrique en mode sondage électrique verticale a été utilisée à l'échelle de détail.

II. LEVE GRAVIMETRIQUE

A. Introduction

Dans ce qui suit, le principe théorique de la gravimétrie est inspiré du manuel, Géophysique : Cours et exercices corrigés de Dubois et al. 2011.

La gravimétrie consiste à mesurer, étudier et analyser les variations dans l'espace et dans le temps du champ de pesanteur de la Terre et des autres corps du système solaire (Dubois et al.2011). Elle est étroitement liée à la géodésie, qui a pour objet l'étude de la forme de la Terre, la mesure de ses dimensions et de ses déformations.

La gravimétrie est l'une des disciplines fondamentales de la géophysique. Son champ d'application couvre différents objectifs, parmi lesquels on peut citer :

- L'étude de la structure interne à diverses échelles.
- L'étude des anomalies gravimétriques permet également de caractériser le comportement mécanique de la lithosphère.
- L'étude des variations temporelles de la pesanteur relève historiquement du domaine des marées terrestres, il s'agit des variations de la pesanteur dues principalement à l'action de la Lune et du Soleil sur le globe terrestre.
- Les changements au cours du temps de la répartition des masses dans le système Terre modifient la pesanteur et le géoïde.
- Enfin, la connaissance du champ de pesanteur à la surface du globe est indispensable à de nombreuses applications de géodésie spatiale, comme la connaissance des orbites des satellites artificiels.

La densité est le paramètre physique principal en gravimétrie. Ce paramètre varie en fonction de la nature des milieux géologiques.

Le but de la méthode est la détermination de la nature géologique du sol à l'aide de la variation du champ gravifique terrestre. Une déformation géologique quelconque, tels que anticlinaux, synclinaux, failles ou remplissage quaternaire mettant en jeu des roches de densités différentes peut être décelée par l'étude du champ gravifique terrestre.

B. Corrections et anomalies gravimétriques

Il est intéressant de comparer valeur théorique et valeur mesurée pour obtenir des anomalies qu'on pourra par la suite analyser et interpréter. Cependant, pour réaliser cette opération, nous sommes immédiatement confrontés aux problèmes suivants :

- La valeur théorique de la pesanteur est valable à la surface d'une Terre solide dont l'enveloppe extérieure est l'ellipsoïde. Or, en général lorsque l'on fait des mesures, on ne se trouve pas sur cet ellipsoïde mais sur une surface différente (sur un relief, en avion, ...). On doit tenir compte de la distance entre les surfaces où l'on connaît la valeur théorique et celle où l'on mesure. De plus, le modèle qui nous a servi à calculer la valeur théorique de la pesanteur n'a pas tenu compte de la présence de matériaux pesants entre ces surfaces, ou lorsqu'on est en mer, de l'eau moins dense que des matériaux solides. On voit donc qu'il est indispensable d'apporter des corrections. Traditionnellement, on parle de réductions ou encore de corrections des mesures. En fait, les corrections que l'on doit effectuer s'appliquent à la valeur théorique de la pesanteur comme on va le voir maintenant. En général, la surface où on effectue la mesure est à une certaine altitude. En pratique, jusqu'à récemment, c'est-à-dire avant l'apport des techniques satellitaires, cette altitude était uniquement connue par rapport au niveau moyen des mers grâce aux techniques dites de nivellement. Par convention, c'est cette altitude dite géoïdale.

1. Correction et anomalie à l'air libre

La correction à l'air libre tient compte de l'effet sur la pesanteur de l'éloignement entre les deux surfaces (géoïde et surface de mesure) indépendamment de la présence de matériau entre ces deux surfaces.

Par définition, l'anomalie à l'air libre est la différence entre la valeur mesurée à une altitude h donnée (comptée positivement vers le haut) et la valeur théorique modifiée en tenant compte de la correction à l'air libre. Soit :

$$a_{al} = g_m - g_0 = g_m - (g_0 - 0,3086h) = g_m - g_0 + 0.3086h$$

On voit qu'en mer l'anomalie à l'air libre sera simplement :

$$a_{al} = g_m - g_0$$

2. Correction et anomalie de Bouguer

La correction précédente ne tenait pas compte du fait qu'entre la surface topographique et le géoïde, il y avait des matériaux solides sur la Terre ou qu'en mer, il y avait de l'eau entre le géoïde et le fond des océans.

L'effet gravitationnel d'un plateau infini de masse volumique ρ et de hauteur h est simplement :

$$\Delta_g = 2\pi\rho Gh$$

Soit en exprimant h en mètre, ρ en $g.cm^{-3}$ et Δ_g en milligals

$$\Delta_g = 0,0419\rho h$$

Ce terme est connu sous le nom de correction de plateau ou correction de Bouguer. Il reste à tenir compte des variations de la topographie autour du point de mesure. C'est ce qu'on appelle les corrections de terrain (C.T.). L'attraction due au terrain est proportionnelle à la densité du terrain ρ .

On peut définir maintenant l'anomalie de Bouguer simple et l'anomalie de Bouguer complète. Par définition, l'anomalie de Bouguer simple sera la différence entre la valeur mesurée à une altitude h donnée (comptée positivement vers le haut) et la valeur théorique modifiée pour tenir compte de la correction à l'air libre et de la correction de plateau. Soit :

$$A_{BS} = g_m - (g_0 - 0,3086h + 0,0419\rho h) = A_{al} - 0,0419\rho h$$

$$A_{BS} = g_m - g_0 + 0,3086h - 0,0419\rho h$$

Par définition, l'anomalie de Bouguer complète sera la différence entre la valeur mesurée à une altitude h donnée et la valeur théorique modifiée pour tenir compte de la correction à l'air libre et de la correction de plateau et des corrections de terrain (CT) Soit :

$$A_{BC} = g_m - (g_0 - 0,3086h + 0,0419\rho h - \rho T) = A_{BC} + \rho T$$

$$A_{BC} = g_m - g_0 + 0,3086h - 0,0419\rho h + \rho T$$

ρT étant les corrections de terrain (toujours positives).

C. En résumé

L'anomalie de Bouguer complète reflète les hétérogénéités de masse sous la surface topographique (ou sous le fond des océans en domaine océanique). Elle est calculée en un point donnée en faisant la différence entre la mesure de la pesanteur et la valeur théorique en ce point. La figure ci dessous résume les corrections gravimétriques (Blakely, 1995).

III. LA PROSPECTION ELECTRIQUE:

A. Introduction

La méthode électrique pour l'étude d'un milieu non homogène comme le sous-sol a été très tôt appliquée par Maxwell qui suggère l'emploi de quatre électrodes, plutôt que deux, pour mesurer la résistance au flux de courant dans un milieu conducteur. Mais c'est seulement à partir de 1912 que Conrad Schlumberger posa les bases de la prospection électrique en dégageant en particulier la notion de résistivité apparente (Mahammed, 2012).

En effet, quand le demi-espace est constitué de couches stratifiées, son idée a été de considérer cette résistivité apparente qui est la résistivité du milieu homogène donnant avec le même dispositif d'émission et de mesure, le même potentiel. Pour une structure horizontale, cette valeur dépend de la configuration d'électrodes.

Du point de vue des principes physiques fondamentaux, les méthodes de prospection électrique peuvent être divisées en quatre groupes:

- Les méthodes à courant continu ou les méthodes de résistivité;
- Les méthodes à basse fréquence dans lesquelles des champs électromagnétiques alternatifs variant lentement sont considérés;
- Les méthodes à haute fréquence basées sur l'étude de champs électromagnétiques qui varient rapidement; et les méthodes géo-électrochimiques basées sur l'utilisation de champs secondaires.

Pour les électrodes, des piquets métalliques sont généralement utilisées, qui sont enfoncées dans le sous-sol. Les électrodes d'alimentation sont généralement désignées par les lettres A et B, les électrodes de réception sont désignées par M et N.

La combinaison des électrodes d'alimentation et de réception, alignées d'une certaine manière sur la surface du sol est appelée dispositif de prospection électrique.

L'idée de la méthode électrique est simple. Un dispositif de prospection électrique est étalé à la surface du sol. Il se compose généralement de deux paires d'électrodes d'alimentation et de deux paires d'électrodes de réception.

B. Principe

En prospection électrique, on fait circuler un courant électrique dans le sol entre deux électrodes de courant et de mesurer la différence de potentiel induite entre deux autres électrodes, appelées électrodes de potentiel, à proximité des électrodes de courant. Puisque l'intensité du courant est connue et que la différence de potentiel est mesurée, il est alors possible de déterminer quelle est la résistivité apparente du

sol étudié. Cette résistivité électrique apparente dépend de la configuration des électrodes de courant et de potentiel. La résistivité électrique apparente ρ_a peut être exprimée en fonction de la différence de potentiel (ΔV) en Volt et de l'intensité du courant (I) en Ampère.

$$\rho_a = K * \frac{\Delta V}{I}$$

ρ_a : S'exprime en Ohm mètre : $\Omega.m$.

ΔV : S'exprime en millivolt : mV.

I : S'exprime en milliAmpère : mA.

K : Coefficient géométrique fonction de la disposition des électrodes.

$$K = \frac{2\pi}{\left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{AN}\right) - \left(\frac{1}{BM} - \frac{1}{BN}\right)}$$

La résistivité apparente présente trois propriétés principales (Dubois et al. 2011):

- ρ_a ne dépend pas de I .
- ρ_a dépend de la configuration géométrique utilisée.
- ρ_a est une sorte de moyenne des résistivités du milieu.

La résistivité apparente ρ_a est aussi fonction de la résistivité du milieu, de la géométrie des diverses couches et de la disposition des électrodes. Il existe plusieurs dispositifs d'électrodes utilisés en pratique : Wenner, Schlumberger, Wenner-Schlumberger, pôle- pôle et dipôle-dipôle sont les plus couramment utilisés. Le choix du meilleur dispositif dépend de la structure à imager, du bruit de fond et de la sensibilité de l'appareil de mesure (Loke, 1994). Les différentes caractéristiques de chaque dispositif sont aussi à prendre en considération : par exemple la sensibilité du dispositif aux changements verticaux et horizontaux, la profondeur effective d'investigation, la couverture horizontale ou encore l'intensité du signal. La figure (III-1) représente les dispositifs Wenner, Schlumberger et dipole-dipole.

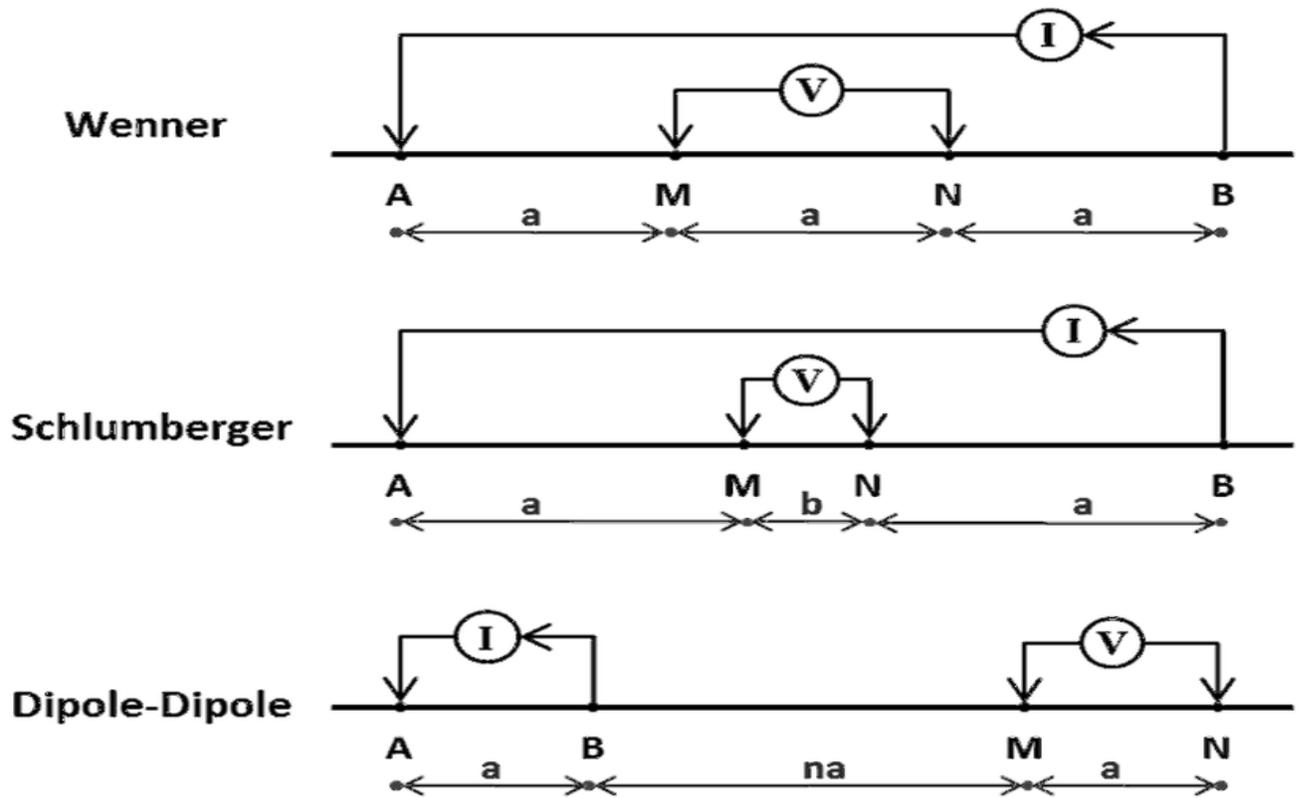


Figure III-1: Dispositifs, Wenner, Schlumberger et dipole-dipole

C. Résistance et résistivité

La résistance (R) est la capacité d'un matériau à s'opposer au passage d'un courant électrique. Elle est mesurée en Ohm (Ω). La résistance dépend de la taille et de la forme du matériau où le courant circule. Doubler la distance sur laquelle circule le courant double la résistance, alors que doubler la section du matériel perpendiculaire à l'écoulement du courant divise en deux la résistance. Par conséquent, la résistance est d'une part due à certaines propriétés du matériau et d'autre part, elle est due à la géométrie du matériau par rapport aux deux points entre lesquels le courant électrique s'écoule et le potentiel électrique est appliqué (PWJ Glover, 2015).

La résistivité ne décrit que les propriétés intrinsèques du matériau relatives à l'écoulement des porteurs de charge et n'est pas affectée par la géométrie de l'échantillon. Elle correspond à la résistance d'un échantillon de 1 m de long et de 1 m² de section. L'unité de la résistivité est l'ohm.m (Ωm).

Pour un courant continu qui traverse un matériau homogène et isotrope d'une longueur L et une section A, la résistance et la résistivité sont liées par:

$$\rho = R \frac{A}{L}$$

Avec : R = résistance (ohms) et ρ = résistivité (ohms*m)

Les unités usuelles sont l'ohm pour les résistances et le mètre pour les longueurs.

L'unité de résistivité sera donc l'ohm*m. L'ohm*cm employé parfois vaut 0,01 ohm.m. La conductibilité σ est l'inverse de la résistivité et s'exprime en mho/m. En hydrogéologie on emploie le plus souvent le micromhos /cm ou microsiemens/cm.

$$\rho \text{ (ohms*m)} = 10'000 / \sigma \text{ (microsiemens/cm)} = 1000 / \sigma \text{ (millisiemens/m)}$$

A strictement parler la loi d'Ohm n'est valable que pour les conducteurs métalliques, pour les gaz et les électrolytes elle n'est qu'une approximation.

D. Résistivité des roches

La résistivité, peut varier (Figure III-2):

- de 1 à quelques dizaines d'ohms.m pour les argiles et les marnes
- d'une dizaine à quelques milliers d'ohms.m pour les grès
- d'une centaine à plusieurs milliers d'ohms.m pour les calcaires et les roches éruptives.

La correspondance entre la résistivité et le faciès géologique est une notion d'une grande importance pratique. Parfois, certains faciès, des argiles par exemple, gardent pratiquement la même résistivité sur des centaines de kilomètres; en général, la résistivité d'une formation est moins constante et peut évoluer progressivement le long d'une même formation spécialement dans les dépôts quaternaires (Chapellier, 2000).

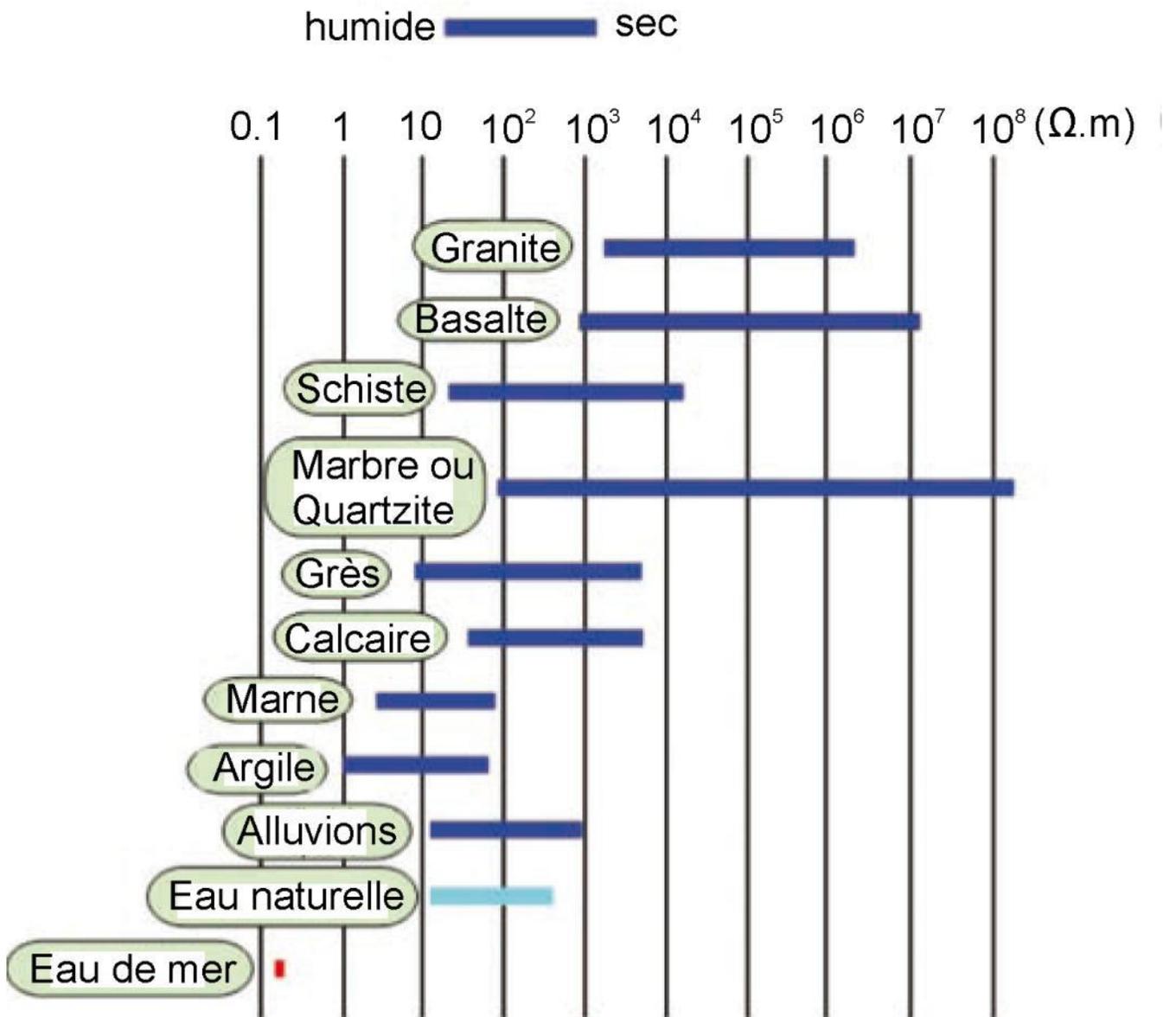


Figure III-2: Résistivités de quelques roches (d'après Florsch and Muhlach, 2018).

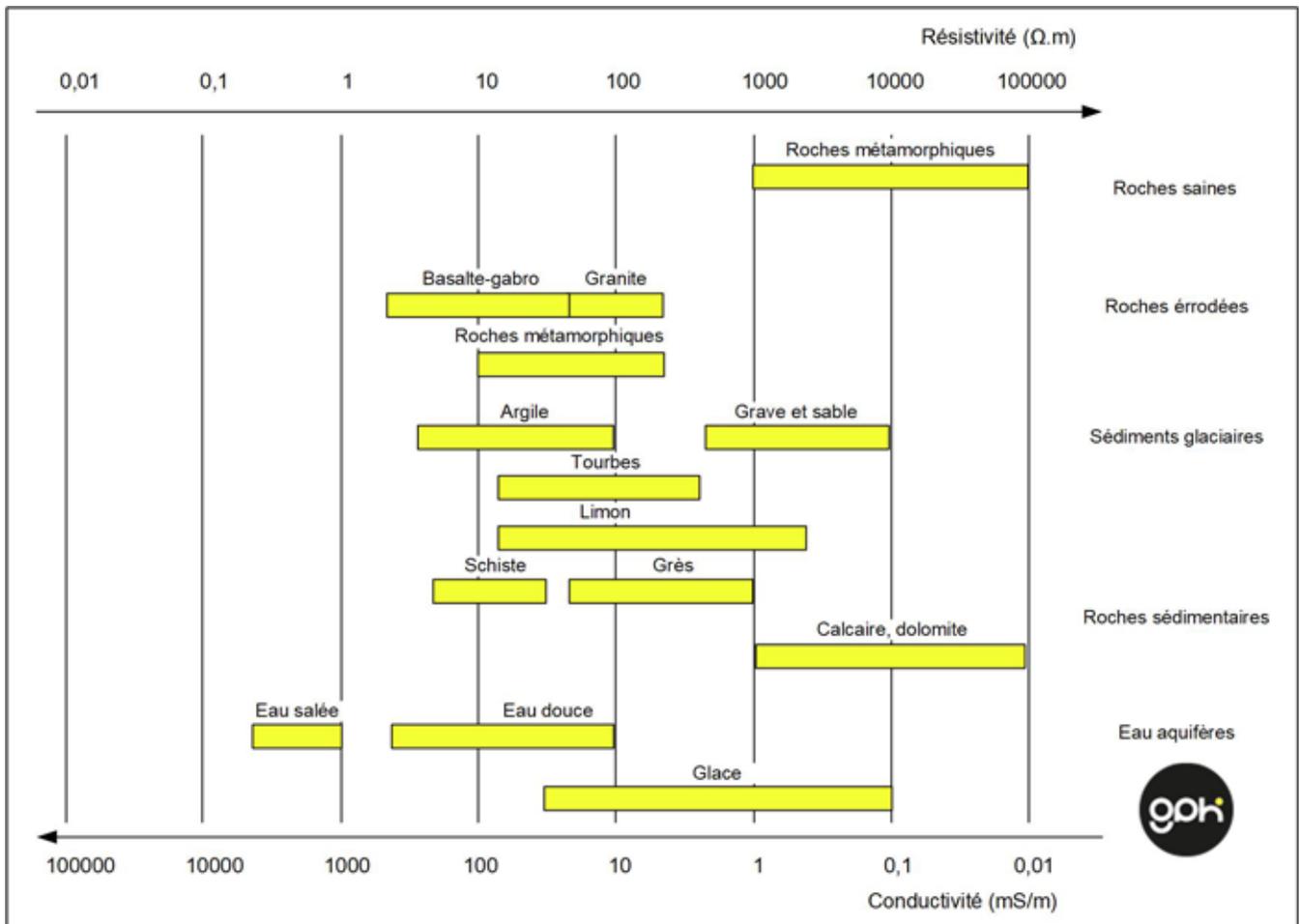


Figure III-3: Echelle de résistivité électrique de différents sols.

E. Sondage électrique vertical

Ci-dessus, on a examiné les principes de fonctionnement d'un dispositif des méthodes électriques. En utilisant une série de mesures similaires, en augmentant progressivement l'écartement de la ligne d'alimentation AB, l'effet de sondage électrique vertical (SEV) est obtenu. Plus l'écartement AB/2 est grand, plus le courant «s'enfonce dans le sol» et plus la profondeur d'investigation est grande (Figure III-4).

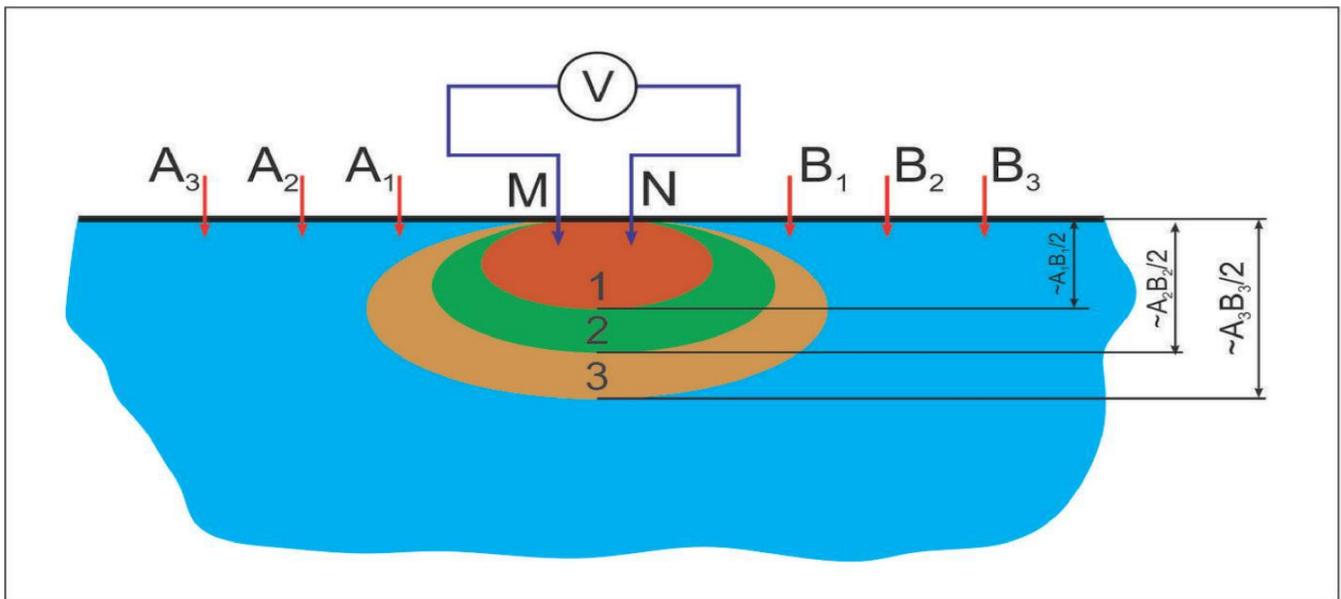


Figure III-4: Effet du sondage électrique dans la méthode SEV, d'après Shein et al. 2018.

F. La tomographie électrique

Cette méthode est relativement récente et doit son principal développement aux progrès effectués en informatique et en traitement mathématique (Marescot, 2008). Depuis quelques années, la tomographie électrique tend à devenir l'outil indispensable de toute personne concernée par des problèmes d'environnement, d'hydrogéologie, de génie civil, de géologie, de recherche de matière première ou d'archéologie. Des applications se développent de plus actuellement dans le domaine de la recherche minière et pétrolière. Les principaux atouts de cette méthode sont son faible coût de mise en oeuvre ainsi que la rapidité du traitement.

Une des limitations des sondages électriques vient du fait qu'ils ne prennent pas en compte les variations latérales de la résistivité du sous-sol. La méthode d'imagerie électrique 2D fut mise au point dans le but d'obtenir un modèle du sous-sol où la répartition de résistivité varie verticalement et horizontalement le long du profil. Dans ce cas, on suppose que la résistivité ne change pas dans la direction perpendiculaire au profil. Cette supposition est raisonnable pour beaucoup de corps géologiques allongés et dans ce cas la méthode pourra être appliquée. Il faudra alors tenter de placer les profils perpendiculairement au corps à étudier ce qui nous permettra également de déterminer les vraies dimensions de ce corps. En théorie, une étude 3D devrait être encore plus précise. Si, pour un sondage, on emploie quelques dizaines de points, il en faudra entre 100 et 1000 pour un profil 2D et plusieurs milliers pour une acquisition 3D. Cette évolution, bien qu'elle permette une amélioration considérable de notre connaissance du sous-sol, pose différents problèmes: le temps d'acquisition important, le coût du matériel toujours plus élevé et

l'interprétation des données de plus en plus nombreuses. L'imagerie 2D semble donc être actuellement un bon compromis entre obtenir des données fiables tout en maintenant un coût d'acquisition et de traitement raisonnable.

1. Acquisition des données de tomographie électrique 2D

Une acquisition 2D utilise en général un grand nombre d'électrodes connectées à un câble multi-conducteurs et placées selon un profil. Un ordinateur portable, dans lequel est programmée la séquence de mesures, est relié à une boîte de commutation et sélectionne automatiquement les électrodes utilisées pour l'injection du courant et la mesure du potentiel (Figure III-5). Chaque électrode possède en effet une adresse numérique unique dans le dispositif, ce qui lui permet d'être identifiée par l'ordinateur. La séquence de mesure est généralement créée sous forme de fichier texte dans lequel sont contenues diverses informations tel que le type de dispositif utilisé. Les formats de ces fichiers dépendent du constructeur. Les câbles multi-conducteurs sont reliés à la boîte de commutation. Un contact galvanique est assuré avec le sol au moyen de piquets métalliques (acier inoxydable) ou encore d'électrodes spéciales éliminant la polarisation spontanée. Un espacement constant est généralement utilisé d'une électrode à l'autre.

Lorsqu'on lance l'acquisition, le programme sélectionne automatiquement les électrodes utilisées pour l'injection du courant et la mesure du potentiel. La mesure est ensuite stockée dans la mémoire de l'ordinateur (ou du résistivimètre). La plus grande partie du temps d'acquisition est donc passée à attendre que le résistivimètre effectue la séquence de mesure.

Pour le dispositif Wenner (Figure III-5), la première mesure (pour le niveau 1) va se faire à l'aide des électrodes 1, 2,3 et 4; les électrodes 1 et 4 serviront à l'injection du courant (A et B), les 2 et 3 à la mesure du potentiel (M et N). Tout le dispositif va ensuite se déplacer d'une distance égale au tiers du dispositif. Les électrodes 2 et 5 serviront alors d'injection du courant et les 3 et 4 de mesure du potentiel. Le processus se répète jusqu'à la dernière électrode. Pour le niveau 2 (level 2), les dimensions du dispositif seront doublées. La première mesure (pour le niveau 2) va se faire à l'aide des électrodes 1, 3,5 et 7; les électrodes 1 et 7 serviront à l'injection du courant (A et B), les 3 et 5 à la mesure du potentiel (M et N). Le processus se répète à nouveau jusqu'à la dernière électrod

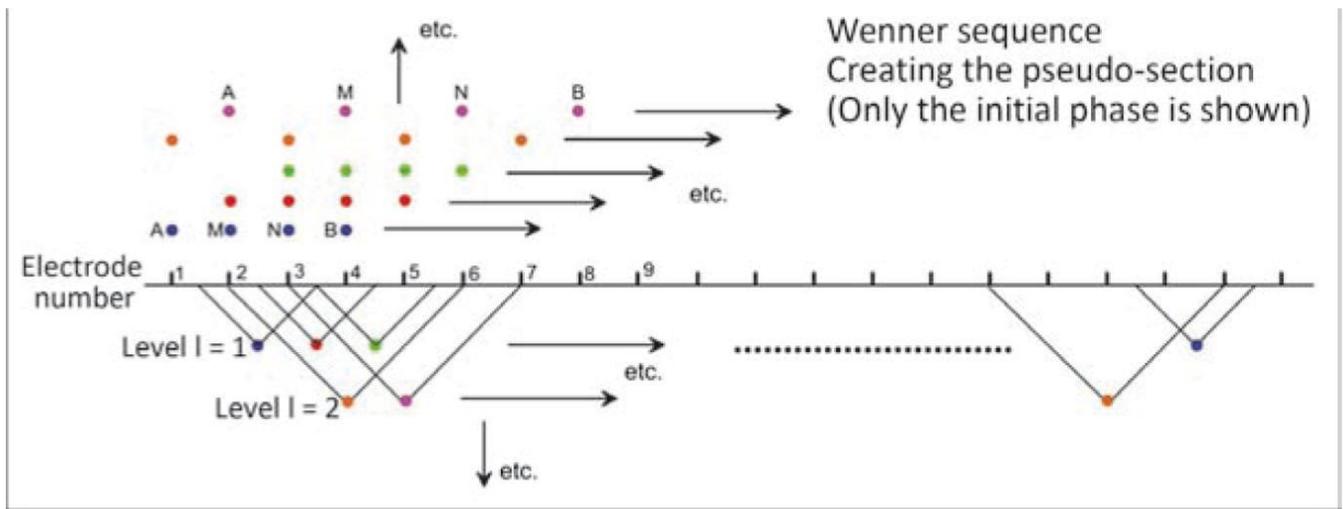


Figure III-5: Arrangement des électrodes pour une acquisition 2D et séquence de mesure pour le dispositif Wenner (D'après Florsch and Muhlach, 2018).

IV. La polarisation provoquée

A. Introduction

La polarisation provoquée (PP) est une technique relativement récente en géophysique. Elle a été principalement appliquée à la recherche des minerais communs, et d'une façon moindre, à celle des formations aquifères.

Les mesures de polarisation provoquée s'effectuent à l'aide d'appareillages utilisant un courant électrique en forme de créneaux bipolaires séparés par des interruptions d'injection.

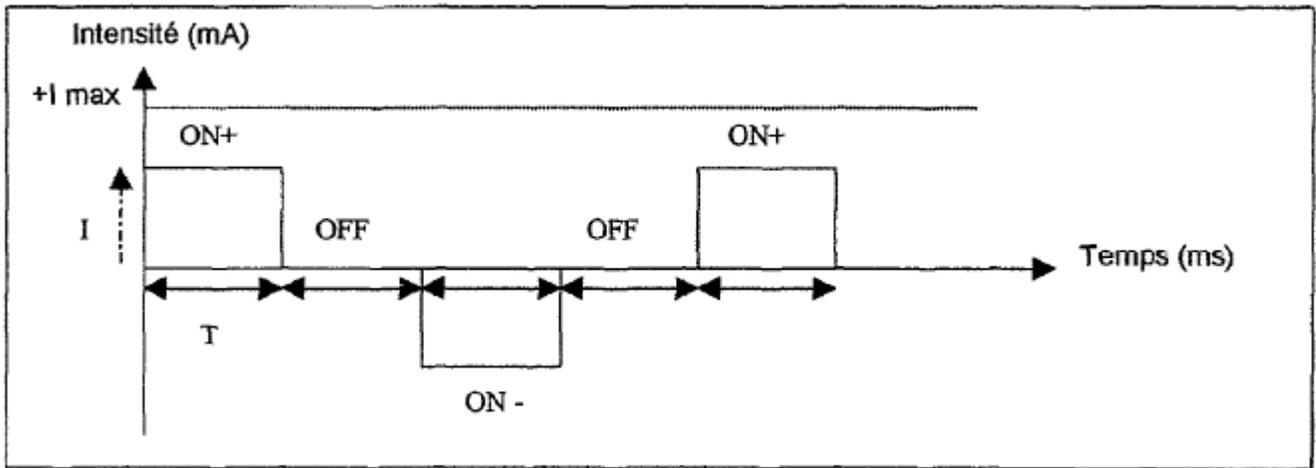


Figure IV-1 : Forme du courant : mode TX-RX Multi-électrodes domaine de temps.

Ainsi, en utilisant un dispositif classique ABMN, on envoie dans le sol ce type de courant entre A et B et on constate, lors des interruptions d'injection, qu'il subsiste entre M et N une différence de potentiel, qui se dissipe plus ou moins rapidement.

Ce potentiel «résiduel » est appelé «polarisation provoquée ».

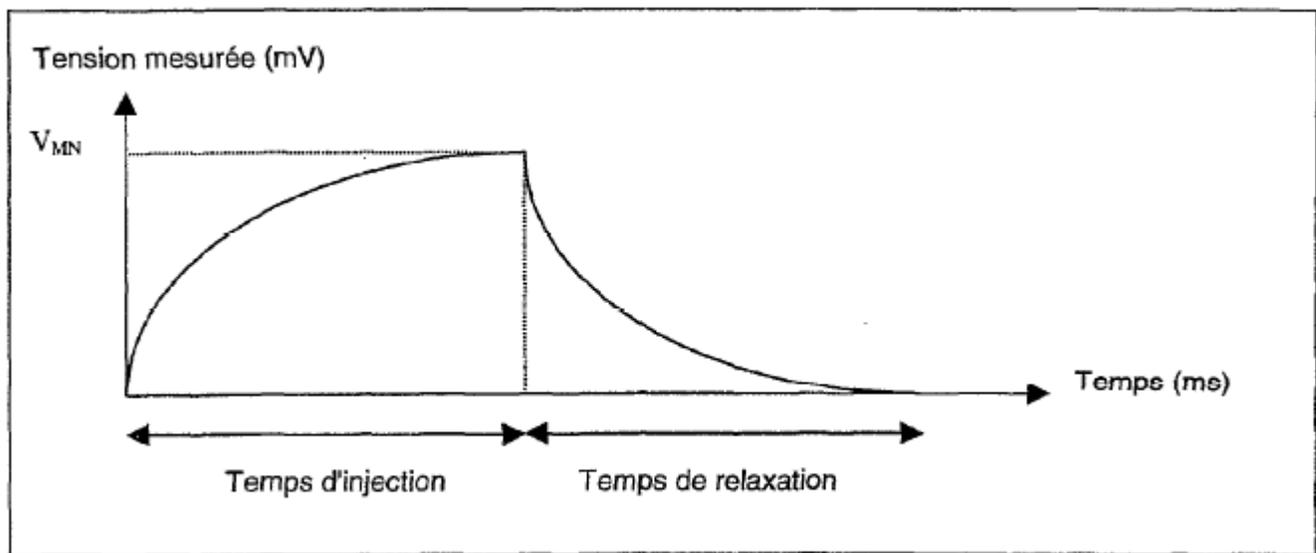


Figure IV-2: Phénomène de décharge

Peu avant 1920, C. SCHLUMBERGER découvrit la polarisation provoquée mais ce n'est qu'à partir de 1948 qu'elle fut appliquée à l'exploration géophysique.

Un type de polarisation, le phénomène de surtension, était connu en chimie physique depuis bien plus longtemps.

La polarisation provoquée se manifeste par la dépendance de l'impédance du sol en fonction de la fréquence du courant.

Il s'agit d'un phénomène extrêmement complexe, que l'on peut comparer de manière très grossière à la variation de l'impédance d'un circuit constitué d'une résistance et d'un condensateur en parallèle en fonction des fréquences du courant.

Cependant, la courbe de décroissance n'est pas exponentielle, comme dans le circuit RC, et ne commence pas à la valeur maximale du potentiel. Ces différences entre le phénomène en PP et en RC sont représentées (figure IV-3).

En domaine fréquentiel, la résistivité apparente du sous-sol diminue quand la fréquence du courant augmente tout comme l'impédance d'un circuit RC en parallèle. Cet effet est appelé (dispersion de résistivité).

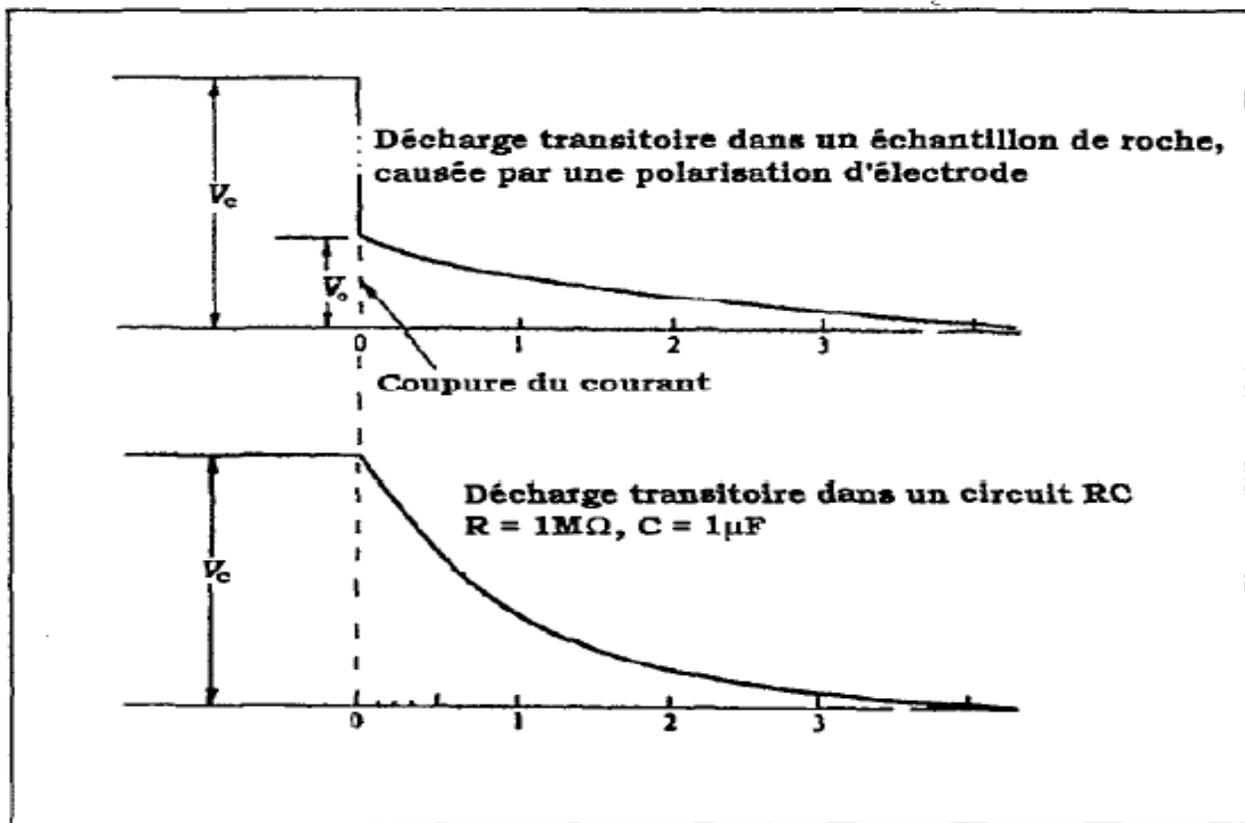


Figure IV-3 : Comparaison des courbes de décharge pour la PP et pour un circuit RC.

B. Les paramètres mesurées en PP

Les mesures de polarisation provoquée peuvent être réalisées dans le domaine temporel ou dans le domaine fréquentiel (spectral). Les paramètres mesurés sont différents d'un domaine à l'autre (mais ils sont liés par les transformations de Fourier ou de Laplace). Généralement, les mesures sur le terrain sont majoritairement acquises dans le domaine temporel (e.g, Florsch et al, 2012 ; Gazoty et al, 2012) car l'acquisition est plus rapide et facile à mettre en oeuvre, évitant en grande partie les problèmes de couplage. De plus, les instruments sont développés (une séquence d'acquisition est programmée) afin qu'un seul lancement de mesures permette d'obtenir deux pseudosections : une de la chargeabilité apparente et l'autre de la résistivité apparente. Au contraire, en laboratoire, les mesures sont acquises dans le domaine fréquentiel où la résistivité complexe du milieu est mesurée sur une large gamme de fréquences (de quelques mHz à kHz). Le couplage électromagnétique en laboratoire est faible car les longueurs de câbles sont moindres.

1. Mesures dans le domaine temporel

Dans ce domaine, la polarisation du milieu se manifeste par une tension secondaire transitoire après l'interruption du courant injecté. Pour faire ces mesures, un courant pseudo-continu en créneaux rectangulaire ($+i_0 -i_0$) est injecté pendant un certaine durée (suffisamment longue pour mieux saturer le milieu) et on mesure la différence de potentiel (figure IV-4). Schlumberger (1930) met en évidence que le potentiel ne revient pas à zéro instantanément après la coupure du courant injecté, mais il décroît rapidement jusqu'à atteindre une valeur V_s puis il décroît quasi exponentiellement avec le temps. Cette décroissance ou relaxation est observée et enregistrée pour calculer la chargeabilité apparente du milieu.

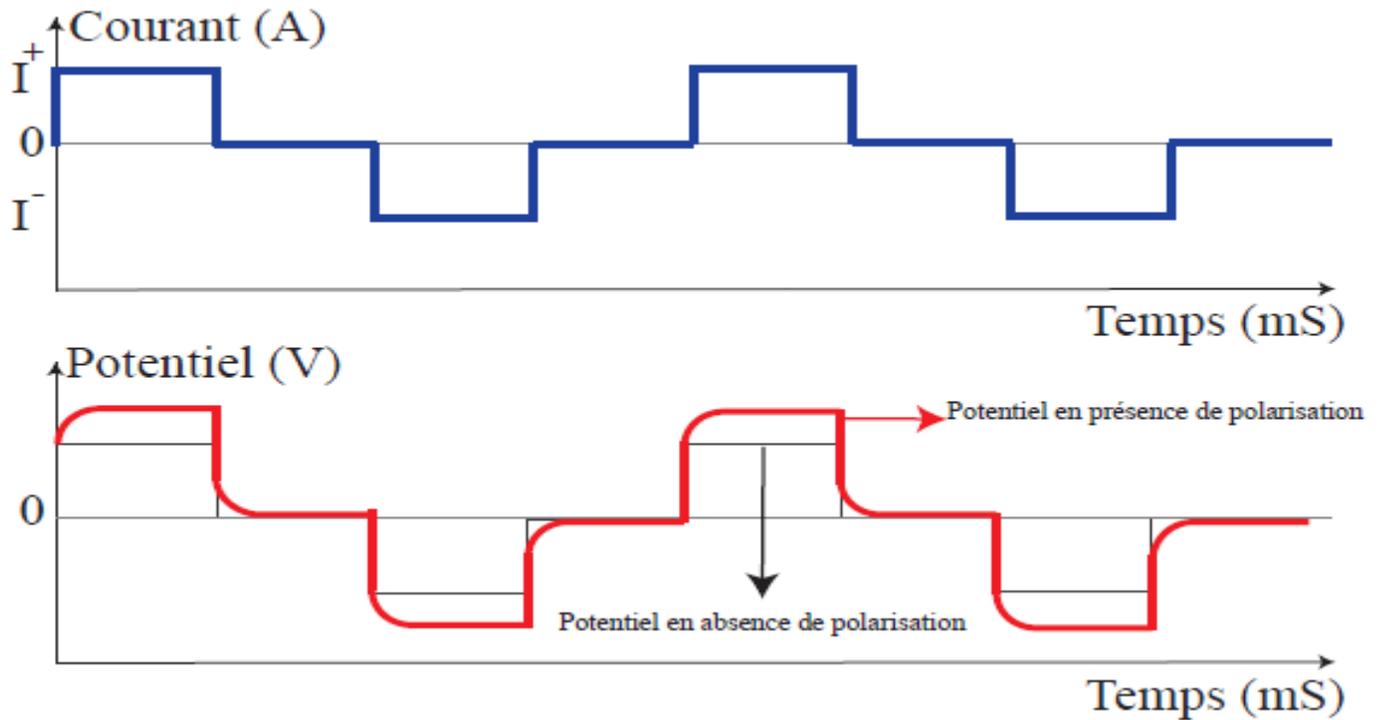


Figure IV-4: Le courant injecté en Polarisation Provoqué Temporelle (en haut), et le potentiel enregistré (en bas), dans un milieu polarisable (en rouge), et un milieu non polarisable (en noir).

Seigel (1959) introduit la notion de chargeabilité m pour décrire la polarisation du milieu en utilisant le potentiel secondaire V_s (mV) et la tension première V_p (mV) mesurée avant la coupure du courant injecté. La chargeabilité s'exprime en mV/V et est définie par l'équation:

$$m = \frac{V_s}{V_p}$$

En théorie, V_s devrait être mesuré à temps-zéro de coupure de courant, mais c'est difficile à réaliser à cause de défaut matériel lié au signal transitoire généré dans l'appareil de mesure au moment de coupure de courant. Dans la pratique, les mesures de potentiel secondaire commencent après un certain temps $Mdly$ (The Delay time en anglais). Par exemple, avec le Syscal Pro les mesures commencent 20 ms après la coupure de courant.

Par conséquent, les appareils de mesures actuels mesurent souvent une autre grandeur, appelée la chargeabilité partielle M_i définie par :

$$M_i = \frac{1}{(t_2 - t_1)V_p} \int_{t_1}^{t_2} V_s(t) dt$$

La figure (IV-5) représente le principe de mesure de la chargeabilité partielle d'après le manuel de Syscal Pro. La chargeabilité apparente M_a est l'intégrale de la zone en-dessous de la courbe de décharge, cette chargeabilité est la somme des chargeabilités partielles calculées à partir de l'équation :

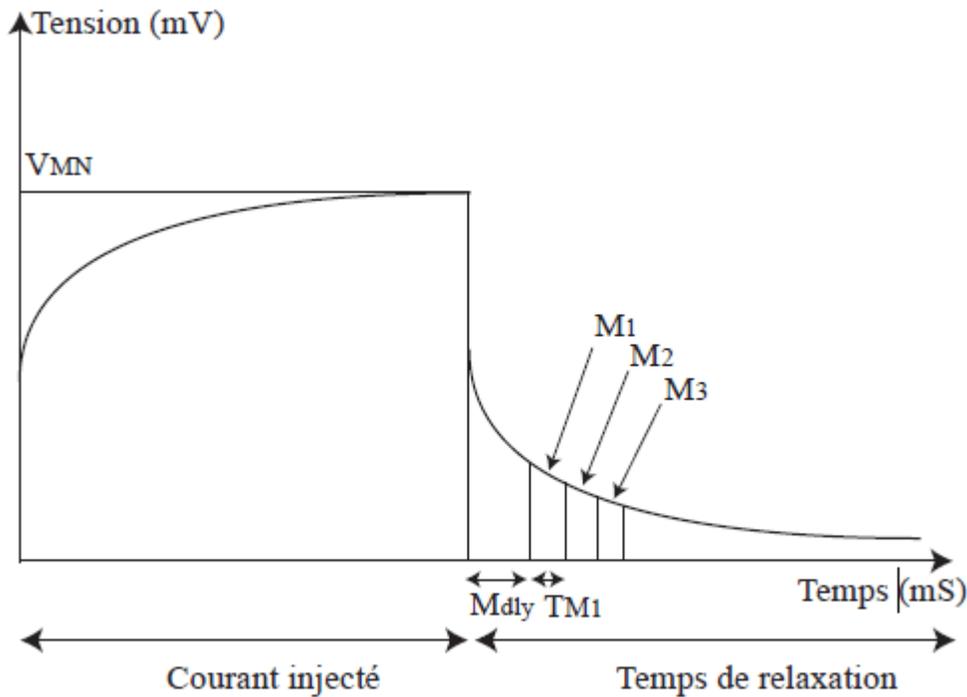


Figure IV-5: Le principe des mesures de chargeabilité partielle à partir de la courbe de décroissance (dessin d'après le manuel du Syscal Pro).

$$M_a = \frac{\sum_{i=1}^n M_i T_{Mi}}{\sum_{i=1}^n T_{Mi}}$$

Où n est le nombre des chargeabilités partielles mesurées (20 chargeabilités mesurées avec le Syscal-Pro).

2. Mésures dans le domaine spectral

Dans ce domaine, la polarisation du milieu est observée à partir de la dispersion à basse fréquence de la résistivité complexe $\rho^*(w)$. Ces mesures consistent à injecter un courant alternatif de type sinusoïdal à une

fréquence donnée, ce qui provoque une différence de potentiel dans le milieu. Cette différence de potentiel sera de type sinusoïdal mais avec un retard par rapport au courant injecté (figure IV-6).

La déphasage entre le courant injecté et la différence de potentiel mesuré est une indication directe de la polarisation du milieu. Les appareils de mesures de la résistivité complexe mesurent deux paramètres fondamentaux : l'amplitude $|\rho|$ et la phase ϕ (où leurs équivalents la partie réelle et imaginaire) de la résistivité complexe pour une gamme de fréquences allant de 1 mHz à 20 kHz (cas du dispositif SIP FUCHS III de la société Radic-Research utilisé pour effectuer nos mesures en laboratoire) :

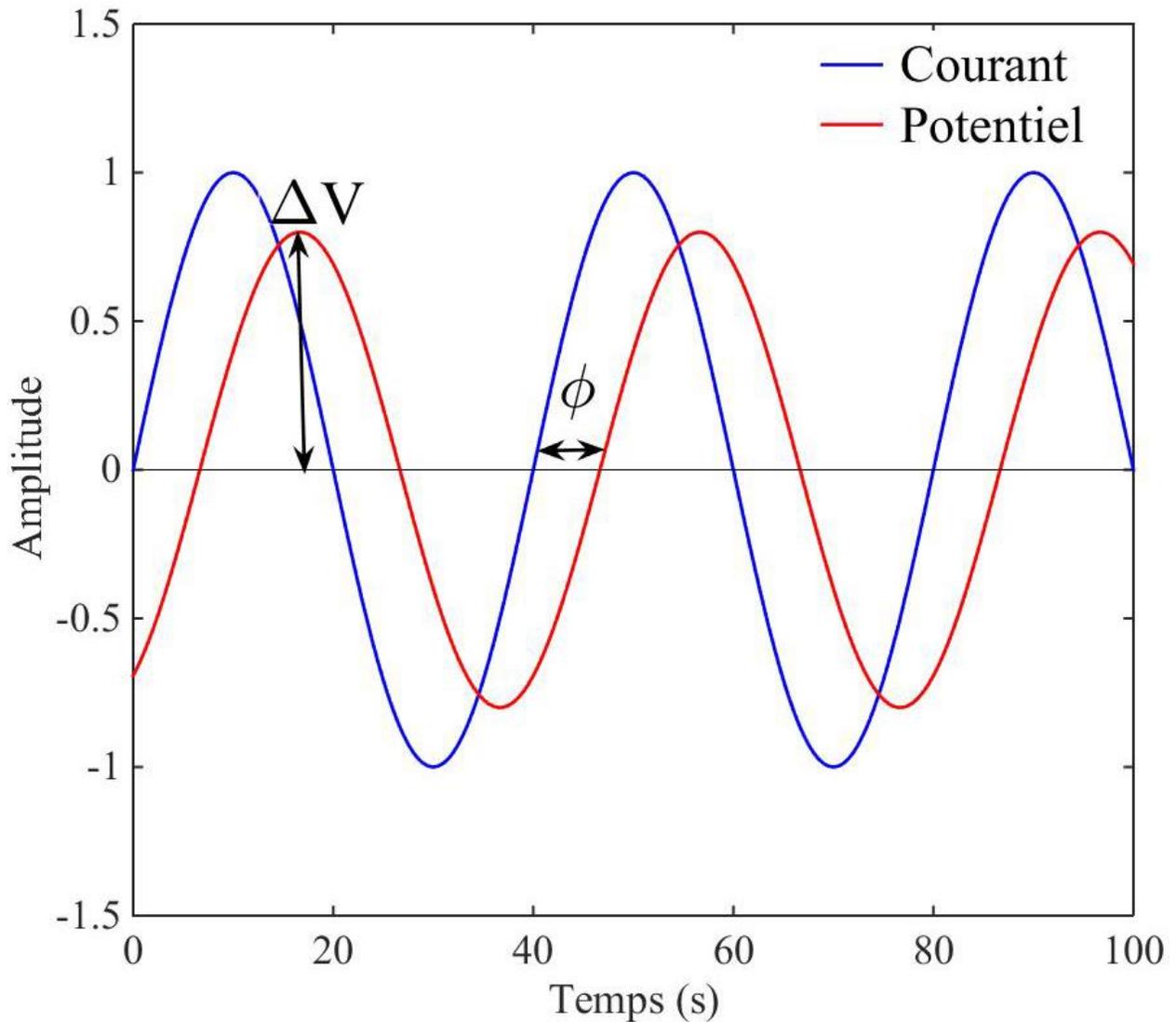


Figure IV-6: Les signaux injecté et mesuré en Polarisation Provoqué fréquentielle.

$$\rho^*(\omega) = |\rho| \exp(i\phi)$$

$$= \rho'(\omega) + i\rho''(\omega)$$

Avec :

$$|\rho| = \sqrt{\rho'(\omega)^2 + \rho''(\omega)^2}$$

$$\phi = \tan^{-1} \left(\frac{\rho''(\omega)}{\rho'(\omega)} \right)$$

La conductivité complexe σ^* , la résistivité complexe ρ^* et la permittivité complexe ϵ^* incluent une partie liée à la dispersion à basse fréquence. Ces trois valeurs effectives sont liées par l'équation suivante :

$$\sigma^* = \frac{1}{\rho^*} = i\omega\epsilon^*$$

Les mesures de résistivité complexe in situ restent limitées à cause des problèmes de couplage électromagnétique. Cependant, d'autres paramètres basés sur la variation de la résistivité avec la fréquence sont calculés. Ces paramètres sont : l'"effet de fréquence" (FE Frequency Effect en anglais) et le "facteur métal" (MF Metal Factor en anglais). Le principe des mesures de ces deux paramètres est de faire des mesures de résistivité à deux fréquences différentes (f_1 et f_2 où $f_1 < f_2$). Ces deux paramètres ont longtemps été utilisés pour justifier la polarisation d'un milieu :

– l'effet de la fréquence (FE) : c'est la différence entre la résistivité mesurée en courant continu (ρ_{dc} où $f_1 = 0$) et la résistivité mesurée à une autre fréquence (courant alternatif ρ_{ac} , $f_2 \neq 0$) normalisée par la résistivité en courant continu (Telford et al, 1990) :

$$FE = \frac{\rho_{dc} - \rho_{ac}}{\rho_{dc}}$$

Ce paramètre peut être exprimé en pourcentage d'après la relation : $PFE = 100FE$

– Facteur métallique (MF) défini par :

$$MF = 2\pi \times 10^5 \left(\frac{\rho_{dc} - \rho_{ac}}{\rho_{dc}\rho_{ac}} \right)$$

Marshall et Madden (1959) ont indiqué que ce paramètre est moins influencé par la résistivité du milieu. Ce paramètre est largement utilisé dans l'exploration de minéraux parce qu'il est sensible au taux de particules métalliques dans le milieu.

C. L'origine des signaux mesures en PP

La polarisation est un mécanisme qui prend en compte le déplacement local ou la réorientation des charges liées lorsqu'un champ électrique externe est appliqué. De nombreuses études fondamentales ont été réalisées sur des milieux polarisables ayant différentes caractéristiques et font appel à quatre types principaux de polarisation aux fréquences inférieures à 1 MHz. Ces mécanismes sont :

a- La polarisation d'électrode (e.g. Wong, 1979 ; Merriam, 2007 ; Revil et al., 2015c).

b- La polarisation de la double couche électrique (e.g. Leroy et al, 2008 ; Vaudelet et al, 2011b).

c - La polarisation de membrane (e.g. Marshall et Madden, 1959 ; Vinegar et Waxman, 1984 ; Titov et al, 2002).

d - La polarisation d'interface (polarisation de Maxwell-Wagner) (e.g. Chelidze et Gueguen, 1999 ; Lesmes et Morgan, 2001 ; Chen et Or, 2006).

Chacune de ces sources de polarisation est discutée plus en détail dans les paragraphes suivants :

1. Polarisation d'électrode

Ce type de polarisation est lié à la coexistence des deux modes de conduction : une conduction électronique assurée par des électrons dans les minéraux métalliques et une conduction ionique assurée par les ions dans la solution porale. En l'absence de champ électrique externe, les particules métalliques se trouvent dans un état neutre. Lorsqu'un champ électrique externe est appliqué à ce système, les charges positives (cations) et les charges négatives (anions) dans la solution porale vont migrer à travers l'électrolyte dans des directions opposées. Par conséquent, les cations et anions ont tendance à se séparer et à s'accumuler à l'interface métal-électrolyte (Marshall et Madden, 1959 ; Wong, 1979). C'est le cas en l'absence d'oxydation en milieu, l'interface est alors 100% polarisable et il n'y a pas de courant Faradique. La densité de charge nette du côté de la solution détermine la répartition des électrons sur le côté métallique. La coupure du courant ou le changement de direction de courant va produire des relaxations des charges vers leur état initial, ce qui produit la relaxation temporelle de la différence de potentiel dans un temps limité (temps de relaxation) et aboutit à ce qui donne la caractéristique de la décroissance de potentiel mesuré au domaine temporel.

2. Polarisation de la double couche électrique

La présence d'une double couche électrique entre la phase solide et la phase liquide est une source de polarisation dans de nombreux matériaux. Certains matériaux ont des surfaces naturellement chargées (par exemple les grains de quartz et les plaquettes d'argile, qui sont généralement chargées négativement). Quand ces grains se trouvent en contact avec l'électrolyte contenant des ions, et en absence d'un champ électrique externe, une zone de haute concentration de charges opposées aux charges à la surface du grain se forme autour de ces grains afin de rétablir l'électroneutralité. Cette zone est divisée en deux parties selon la concentration des charges et la mobilité de ces dernières. La première partie est appelé la couche de Stern (la couche compacte).

Elle est caractérisée par une forte concentration de charges ayant par des liaisons fortes avec les charges de surface du grain. Le plan externe de Helmholtz (Outer Helmholtz plane, ou OHP), généralement délimite la couche de Stern et la couche diffuse. La deuxième couche est la couche dite diffuse (couche de Gouy-Chapman) ; cette couche est caractérisée par des charges mobiles et une concentration ionique moindre que dans la couche de Stern, mais qui reste plus forte que la concentration ionique dans l'électrolyte libre. Au-delà de la couche diffuse se trouve l'électrolyte libre où les conditions d'électroneutralité sont établies. Normalement, l'épaisseur de la double couche électrique est très fine en comparaison avec la taille du grain (e.g, Revil et Florsch, 2010).

La structure de la double couche électrique décrite au-dessus est déjà établie par les forces d'attraction électrostatiques et chimiques en l'absence de champ électrique externe. En appliquant un champ électrique externe E , les charges dans la double couche électrique (Stern et diffuse) se déplacent tangentiellement à la surface du grain (e.g, Schwarz, 1962 ; Lesmes et Morgan, 2001).

Ce mouvement des charges en direction ou à l'opposé du champ électrique (selon la polarité de ces charges) va polariser la double couche électrique (figure IV-7). À l'interruption de l'injection de courant, il se produit un phénomène de rétro-diffusion des charges de la double couche électrique vers leur position initiale (Revil et Florsch, 2010). Les contributions des deux couches électriques dans la réponse totale du milieu sont difficilement séparables, mais l'influence de la couche compacte est plus grande parce que la concentration des charges y est plus élevée (Lesmes et Morgan, 2001). Dans le domaine fréquentiel, ce mouvement des charges à la surface des grains est à l'origine de la conductivité de surface (cette conductivité est dépendante de la fréquence (Lesmes et Frye, 2001)). Parce que la polarisation dans ce cas est liée au mouvement tangentiel des charges à la surface du grain, il est possible d'établir une relation donnant le temps de relaxation en fonction de la taille des grains et du coefficient de diffusion des

charges dans la double couche électrique et plus particulièrement la couche de Stern (Schwarz, 1962 ; Revil et Florsch, 2010).

3. Polarisation de membrane

Ce phénomène de polarisation correspond à une sorte de filtration des ions dans les interstices et étranglements topographiques étroits du milieu. Généralement, les minéraux nonmétalliques (quartz, argiles. . .) sont chargés négativement et entourés par une double couche électrique. Donc, dans un milieu contenant des pores étroits ou des grains très proches, les parties externes de la double couche électrique (la couche de diffuse) se chevauchent (Okay et al, 2014) et définissent des zones sélectives qui empêchent le passage des ions de même charge que les charges de surface des grains.

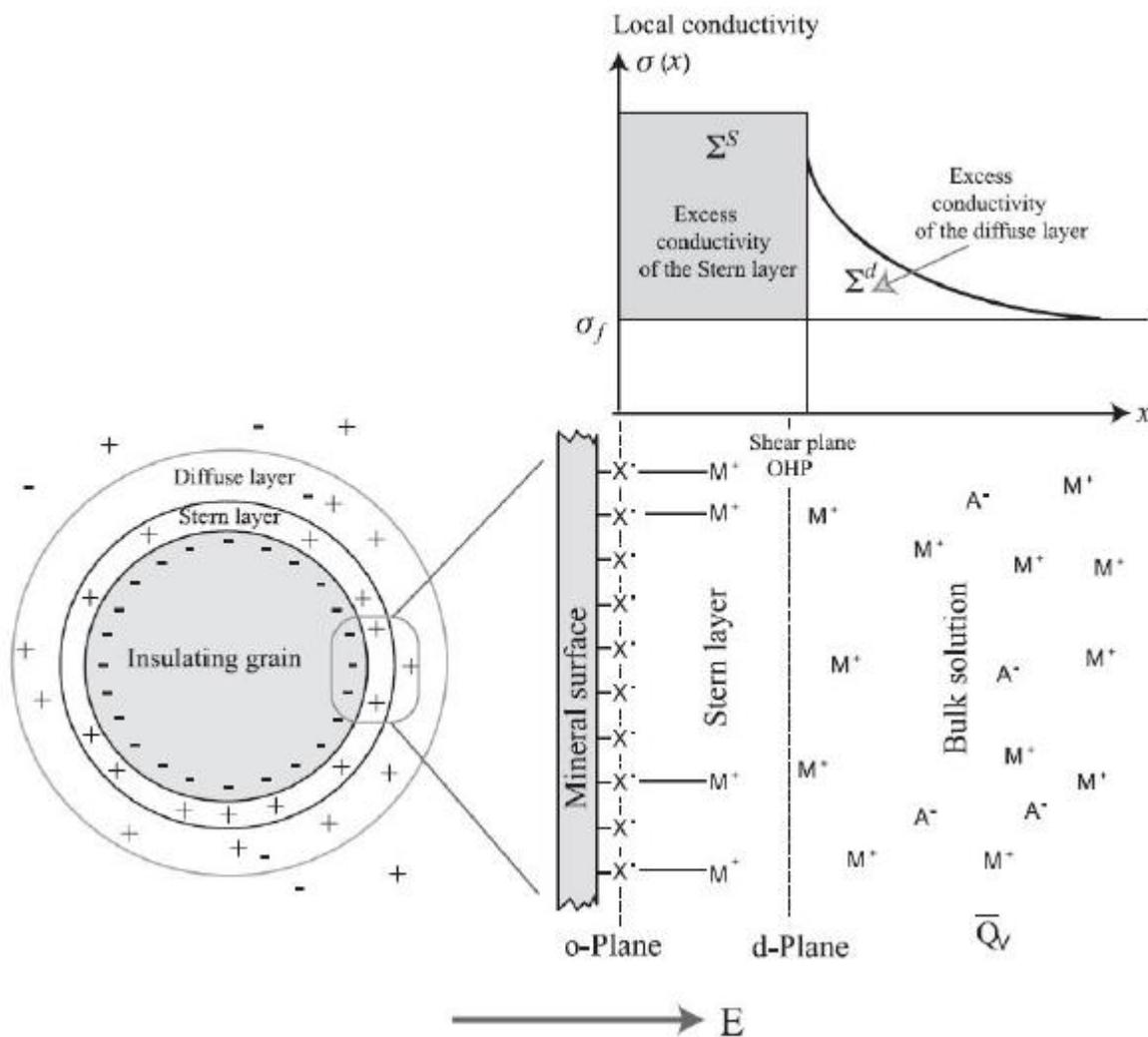


Figure IV-7: Représentation schématique de la double couche électrique construite autour d'un grain isolant (dessin d'après Revil et Florsch (2010)).

Des grains restent séparées et le passage des ions est possible (zones non-sélectives ou non-actives) (Vinegar et Waxman, 1984). L'application d'un champ électrique externe provoque le déplacement des anions et des cations dans l'électrolyte libre jusqu'à rencontrer par endroits la zone sélective où les mobilités des charges sont différentes ce qui va créer un gradient de concentration des charges des deux côtés des zones sélectives. Lorsque le champ électrique est interrompu, ces charges se relaxent vers les états d'équilibre initiaux. Cette relaxation des charges vers l'état initial produit un courant électrique, ce qui constitue la réponse PP du milieu.

La polarisation de membrane est donc particulièrement importante en présence d'argiles, lesquelles impliquent généralement des espaces poreux très réduits. Cependant, la polarisation de membrane est plus forte pour une concentration relativement faible d'argiles (lorsque la dispersion des particules va augmenter le nombre de zones sélectives (Slater *et al*, 2006)). Pendant longtemps, ce phénomène de polarisation a été associé à la présence d'argile dans le milieu. Mais récemment des études ont prouvé l'existence de la polarisation de membrane dans d'autres milieux (Titov *et al*, 2002), toujours en lien avec la présence de gorges très fines ou de grains très proches les uns des autres.

4. Polarisation d'interface

L'effet Maxwell-Wagner ou la polarisation d'interface se produit dans un milieu hétérogène contenant différentes phases (solide, liquide et/ou gaz). Les interfaces entre ces phases ayant différentes propriétés électriques vont créer des discontinuités de déplacement des porteurs des charges électriques dans le milieu. Lorsqu'un champ électrique externe est appliqué sur un tel milieu hétérogène, les charges libres se déplacent dans des directions opposées jusqu'à l'interface (discontinuité électrique) présentant un contraste de conductivité électrique et/ou de permittivité diélectrique. Cette accumulation des charges électriques crée des dipôles électriques (Chen et Or, 2006). La relaxation de ces charges accumulées vers leur état d'équilibre électrique initial, suite à l'arrêt du champ électrique imposé, va créer le signal de polarisation provoquée.

Ce phénomène se produit à des fréquences généralement supérieures ou égales au kHz (Leroy et al, 2008 ; Tabbagh et al, 2009 ; Vaudelet et al, 2011b).

Ce mécanisme de polarisation est dépendant du contraste des propriétés électriques des composants du milieu (Lesmes et Morgan, 2001) et de l'organisation spatiale de ces phases. Il est donc lié au facteur de formation (Revil et Florsch, 2010)).

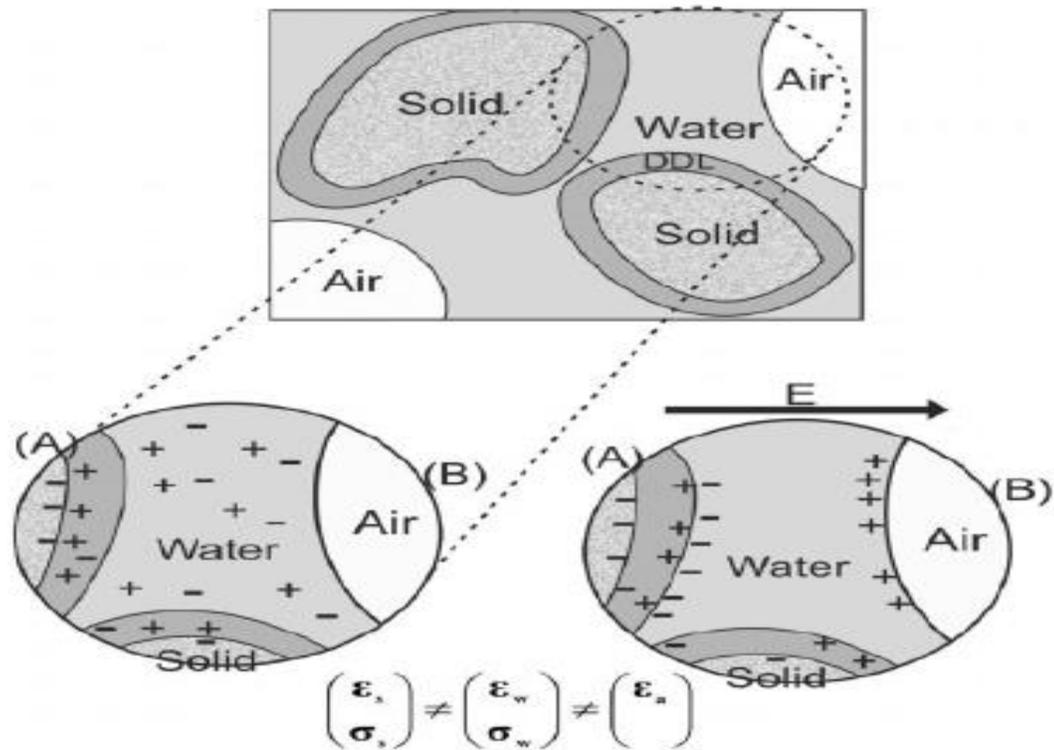


Figure IV-8: Polarisation d'interface (effet M-W) dans un sol ; (A) alignement des charges associées à l'interface solide-liquide sous l'influence d'un champ électrique externe ; (B) l'accumulation des charges à l'interface liquide-air. Extrait de Chen et Or (2006).

Il est important de préciser que ces quatre types de polarisation (la polarisation d'électrode, la polarisation de membrane, la polarisation de la double couche et la polarisation d'interface) se superposent pour donner la réponse globale du milieu. Il est difficile de distinguer (dans la gamme de fréquence mHz- kHz), ces différentes sources du signal, car dans tous les cas il y a une sorte de diffusion des charges (relaxation des charges) dépendant de leur mobilité. A noter que Marshall et Madden (1959) mentionnaient déjà, dans leur étude sur l'origine de la polarisation, l'impossibilité de distinguer la polarisation d'électrode de la polarisation de membrane.

D. Les applications de la méthode de polarisation provoquée

La Polarisation Provoquée a un usage historique dans le domaine minier (Scott et West, 1969 ; Pelton et al., 1978 ; Nelson et Van Voorhis, 1983), mais le nombre d'applications de la PP dans différents domaines (écologie, hydrogéologie, génie civil et archéologie) ont crû ces dernières années grâce aux développements menés sur les appareils de mesures et l'augmentation des études destinées à relier les

observations des mesures de PP aux paramètres physiques et pétrophysiques du milieu. Dans la suite de cette section, nous présentons quelques exemples des applications de PP fréquentielle en laboratoire et temporelle sur le terrain.

**CHAPITRE IV : METHODOLOGIE
D'ACQUISITIONS DES DONNEES
GEOPHYSIQUES**

CHAPITRE IV : METHODOLOGIE D'ACQUISITIONS DES DONNEES GEOPHYSIQUES

I. Introduction

Ce chapitre expose la méthodologie d'acquisition des données géophysiques régionales de gravimétrie sur la feuille de Bou Khadra au 1:50 000 et les données de prospection électrique de détail sur les sites de Oum Sbaa et El Fedj.

II. TRAVAUX GEOPHYSIQUES ANTERIEURS

Un levé aeromagnétique et aerogammaspectrométrique a été réalisé par la firme américaine Aeroservice Ltd pour le compte de la SONAREM. Les résultats de ces travaux sont présentés sous forme de cartes isolignes du champ magnétique total T avec une section de 2 gammas. L'échelle de ces cartes est 1:100 000. Ce levé a un caractère régional, à partir duquel on peut voir les grandes structures et les failles régionales.

En 1990 Zerdazi a fait une étude gravimétrique de la région. IL a dressé des cartes gravimétriques au 1:200 000 à section de 2 mgals. L'analyse conjointe des données gravimétriques et aeromagnetiques a une nouvelle fois éclairci la structure géologique de la région.

L'étude géophysique ayant un caractère local remonte à 1974. Elle a été effectuée par une équipe soviétique, dirigée par le chef technique Tonkikh et l'Ingénieur géophysicien Pantelev.

Les travaux géophysiques ont été effectués sur les chantiers Hamimet Nord et Hamimet sud. Les travaux réalisés sont:

La gravimétrie, la magnétométrie et la prospection électrique dans plusieurs variantes : Le Sondage Electrique Vertical (SEV), Le Profilement Electrique Combiné (PEC), Le Profilement Electrique Symétrique (PES) et le Champ Electrique Naturel (PS).

Les auteurs n'ont pas fait un levé de polarisation provoquée et cela vraisemblablement à cause du manque d'appareillage.

III. Leve gravimetrique de la region

A. Description du levé gravimétrique

Cette étude est extraite de la levée gravimétrique qui a été réalisée dans le cadre de la préparation de la thèse de Zerdazi, à l'Université de Lausanne (Suisse) avec le concours logistique et technique de

l'Entreprise Nationale de Recherche Minière (EREM) ex SONAREM. L'EREM a mis à disposition du projet des véhicules, des gravimètres, des techniciens topographes et des techniciens géophysiciens (Boubaya, 2013). Le gravimètre de marque SODIN utilisés pendant ce levé sont au nombre de quatre (04). Les quatre gravimètres ont été étalonnés sur les stations de Meftah, Larbaa, Ain Taya et l'EREM. Tous les gravimètres ont donné des coefficients très proches de celui du constructeur. Un cinquième gravimètre de marque Lacoste Romberg appartenant probablement à l'Institut de Géophysique de l'Université de Lausanne(Suisse) a été aussi utilisé pendant l'établissement du réseau de bases dans la partie ouest de la zone d'étude.

La valeur théorique de la pesanteur utilisée dans les corrections de l'anomalie de Bouguer est celle de 1930. D'après Zerdazi (1990), le but de l'emploi de la valeur théorique de 1930 est de comparer le présent levé gravimétrique avec les levés gravimétriques antérieurs, et en particulier, celui de Lagrula (1951). La densité de correction du plateau est de 2.67 g/cm^3 .

Les mesures gravimétriques ont été réalisées en des points cotés ou photogramétriques et sur des points de triangulation indiqués sur ces cartes topographiques. Les coordonnées rectangulaires Lambert de ces points ont été établies avec une précision de 25 mètres, à partir des cartes topographiques au 1/ 50 000.

Le réseau de base qui compte 2 à 3 stations par feuille a été rattaché à la station fondamentale de Bouzaréah. L'erreur sur l'anomalie de Bouguer est de l'ordre de 1.1 mgal (Zerdazi, 1990).

IV. Methodologie d'acquisition des données électriques

Dans cette étude on a utilise trois types de dispositifs :

1/Le Dispositif gradient Oum Sbaa ($AB= 600 \text{ m}$, $MN=40 \text{ m}$, $\text{pas}=20 \text{ m}$).

2/Le Dispositif symétrique El Fedj ($AB= 200 \text{ m}$, $MN=40 \text{ m}$, $\text{pas } 20$).

3/Le sondage électrique vertical-polarisation provoquée.

Les sondages électriques verticaux (SEV) ont été réalisés par le dispositif symétrique Shlumberger.

Les écartements maximum des SEV ont attient une longueur qui varie entre $AB/2=750$ et 1000 m .

Le protocole de mesure du dispositif quadratique symétrique shlumberger est le suivant.

Tableau 1:représenté Le protocole de mesure du dispositif quadratique symétrique Shlumberger.

N°	$AB/2$	MN	K
1	3	2	12.566
2	4.5	2	30.238
3	6	2	54.978
4	9	2	125.66
5	15	2	351.86
6	15	10	62.832
7	25	10	188.5
8	25	2	980.18
9	40	10	494.8
10	65	10	1319
11	65	40	300.41
12	100	40	753.98
13	100	10	3134
14	150	40	1736
15	225	40	3945
16	225	150	942.48
17	325	150	2094
18	325	40	8264
19	500	150	5118
20	750	150	11663
21	1000	150	20826

Appareillage Utilisé

Les mesures ont été effectuées à l'aide d'un appareillage de marque Scintrex, il comprend :

- un groupe électrogène de type Briggs and Stratton.
- un émetteur TSQ3.
- un récepteur analogique IPR8.
- des électrodes émettrices en acier.
- des électrodes impolarisables pour la réception.

L'onde émise par l'émetteur a une forme carrée (2s on, 2s off, 2s on).

La quantité M(Chargeabilité) mesurée par le récepteur est la valeur moyenne de la tension transitoire pendant un intervalle de temps sélectionné (2S), auquel les normalisations suivantes ont été appliquées :

- Normalisation pour la longueur de l'intervalle d'intégration.
- La forme de la courbe.
- Le nombre d'impulsions.

A. Traitement des sondages électriques

Le traitement des données de sondage électrique vertical (SEV 08), consiste à tracer la courbe moyenne de sondage électrique sur du papier bilog. En effet, cette courbe est constituée de plusieurs segments MN.

Dans notre cas, Les segments MN sont : 2, 10, 40 et 150. La courbe finale a été moyennée.

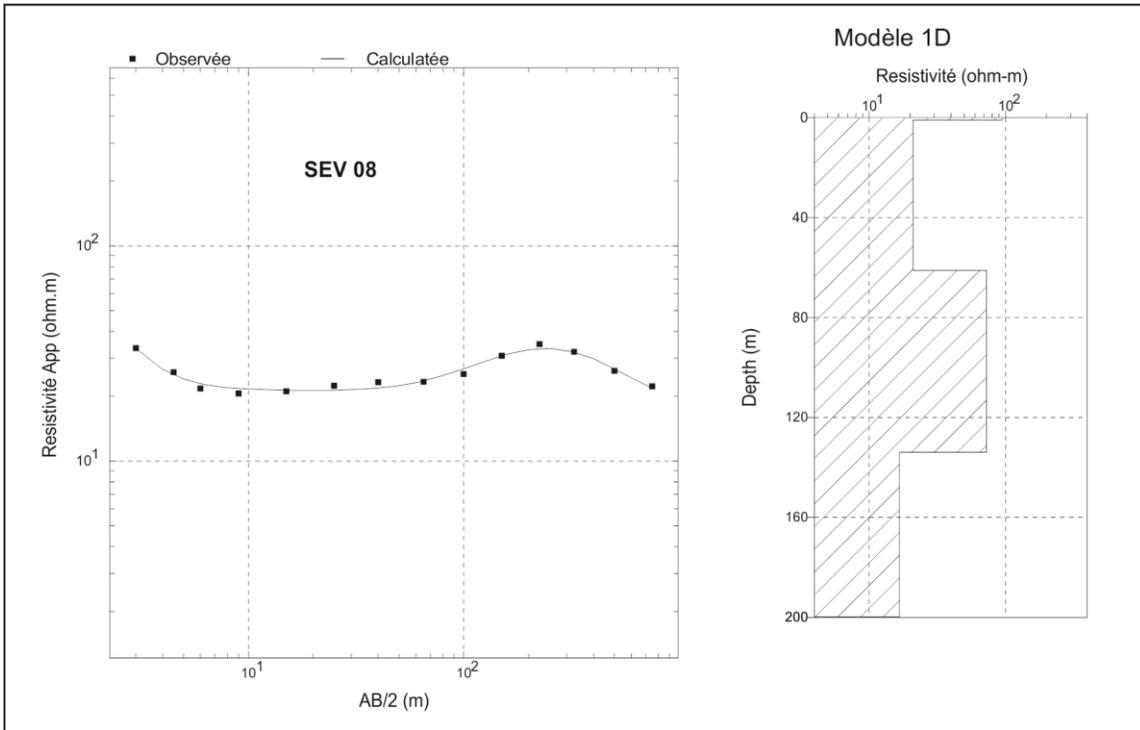


Figure IV-1: exemple de traitement et interprétation des données de (SEV 08) d'El Fedj.

**CHAPITRE V : RESULTATS ET INTERPRETATIONS
DES DONNEES GEOPHYSIQUES**

CHAPITRE V : RESULTATS ET INTERPRETATIONS DES DONNEES GEOPHYSIQUES

I. INTRODUCTION

Nous avons repris tous les travaux géophysiques de sondage électrique (SE) et de gravimétrie réalisés dans les régions d'Oum Sbaa et El Fedj. Les sondages électriques ont été réalisés par l'ORGM dans le cadre du projet : Prospection des polymétaux sur Hamemet et Djebissa (ORGM 2002, rapport inédit) et dans le cadre du projet : « Prospection et évaluation du fer dans la région de Boukhadra » Les données gravimétriques sont extraites du levé gravimétrique réalisé par A. Zerdazi (1990) et concernent la feuille N° 151 (Bou Khadra).

II. ETUDE GRAVIMETRIQUE DE LA REGION DE BOU KHADRA

A. Carte de l'anomalie de Bouguer

Le levé a été réalisé sur la feuille Boukhadra au 1 : 50 000 avec une densité de 1 point par 4 km². La carte gravimétrique de l'anomalie de Bouguer a été réalisée avec la méthode « minimum de courbure » avec un pas de grille égale à 500 m.

Les valeurs de l'anomalie de Bouguer varient entre un minimum de -52 mGal et un maximum de -15 mGal (figure II-1). Ces valeurs négatives sont dues probablement à l'effet de la racine crustale (D'après le principe d'Isostasie au sens d'Airy).

La couleur bleu sur la palette de couleur indique les faibles valeurs de l'anomalie de Bouguer entre -52 et -41 mGal situé dans le fossé de Morsott et Aïn Zarga.

Les valeurs maximales de l'anomalie de Bouguer sont indiquées par la couleur rouge entre -23 et -15 mGal (ex : Dj Def et Dj BouKhadra).

Les couleurs jaune +vert correspondent aux valeurs intermédiaires de la d'anomalie de Bouguer entre -40 et -25 (ex : les Fossés d'El Meridj et El Aouinet).

La région d'Oum Sbaa situé dans la zone intermédiaire de l'anomalie de Bouguer.

La région d'El Fedj situé dans la zone maximale de l'anomalie de Bouguer.

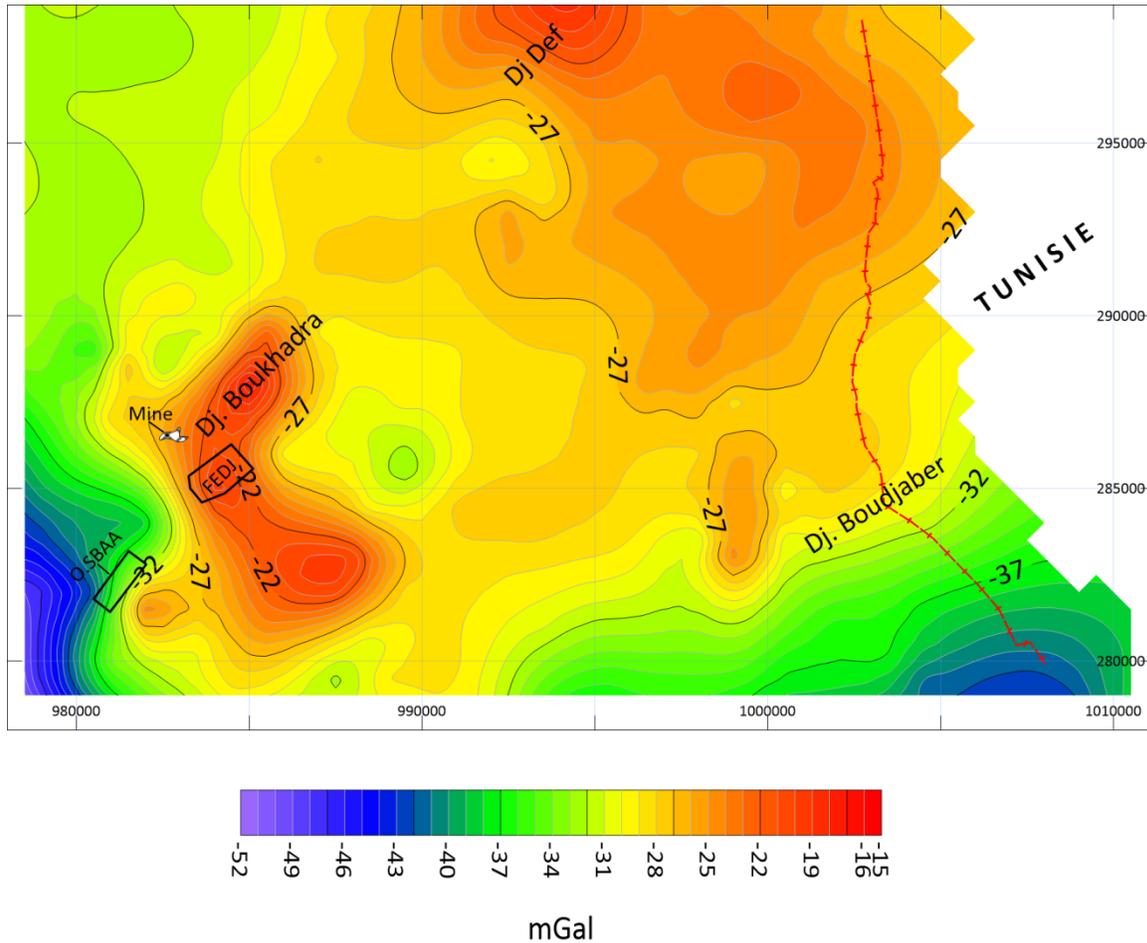


Figure II-1 : Carte de l'Anomalie de Bouguer de la région de Bou Khadra, les deux cadres indique la région d'étude.

Separation des anomalies

L'anomalie de Bouguer prend en compte aussi bien les effets gravifiques des structures profondes et étendues que ceux provoqués par des structures superficielles locales. Aussi, l'élimination de l'effet régional provoqué par les structures profondes est l'une des opérations d'interprétation les plus importantes en gravimétrie (Belhia, 1990). Cependant, quand on parle d'une anomalie régionale provenant de structures profondes et étendues, il faut avoir à l'esprit le rapport qu'elle a avec l'échelle de la région étudiée. Dans une campagne gravimétrique, le choix de l'anomalie régionale est prépondérant.

Dans la mesure où l'on ne connaît généralement pas la géométrie des interfaces profondes, pour déduire leur effet gravimétrique en surface, on a le choix entre diverses méthodes indirectes (Martlet, 1999). De

nombreuses publications (Grant et West, 1965 ; Mesko, 1965 ; Ku et al, 1971 ; Nettleton, 1976 ; Telford et al, 1986 ; Wessel, 1998 ; Keating et al, 2013) ont été consacrées à cette étape délicate du traitement gravimétrique. Toutes ces publications ont pour point commun de considérer que les grandes longueurs d'onde du signal ne sont dues qu'à des interfaces profondes, (ce qui n'est pas parfaitement vrai, puisqu'une source superficielle de grande extension pourra également avoir un effet de grande longueur d'onde).

Néanmoins, parmi ces méthodes on trouve par exemple :

- le filtrage des courtes longueurs d'onde du signal,
- le retrait au signal du champ prolongé vers le haut,
- le retrait au signal d'une surface lissée approximant le champ à une échelle régionale,
- le retrait au signal d'un champ en harmoniques sphériques Dues aux effets du contraste de densité et de la géométrie, les longueurs d'onde contenues dans la résiduelle et celles contenues dans la régionale se chevauchent. La séparation résiduelle/régionale est souvent incomplète (Anecchione, 2000).

L'existence de plusieurs techniques de séparation des anomalies montre qu'ils subsistent encore quelques problèmes non résolus dans ce domaine (Nabighian et al. 2005). Il n'y a aucune "bonne méthode" pour mettre en évidence les cibles d'intérêt. Le problème de séparation des anomalies est loin d'être résolu et selon Baranov (1957), il est peu probable que l'on puisse trouver un jour une solution unique, acceptée par tous et valable dans tous les cas. Zerdazi (1990), dans son étude originale, a estimé le gradient régional par trois(3) méthodes : (1) la méthode analytique de Fourier, (2) la méthode analytique de Baranov (1954) et (3) le calcul par un polynôme du troisième degré. Cependant, sur les trois régionales établies, ils subsistent encore des anomalies de grandes longueurs d'ondes comme par exemple le minimum ovoïde dans la partie SW de la carte résiduelle ou le maximum à l'extrémité NE de la zone d'étude (Zerdazi, 1990, p.126).

B. Analyse de la carte d'anomalie résiduelle

Partons de la relation bien connue:

Anomalie résiduelle = Anomalie de Bouguer - Anomalie Régionale

Le levé a été réalisé sur la feuille Boukhadra au 1 : 50 000 avec une densité de 1 point par 4 km². La carte gravimétrique de l'anomalie de Bouguer a été réalisée avec la méthode « minimum de courbure » avec un pas de grille égale à 500 m.

Les valeurs de la gravimétrie de résiduelle varient entre un minimum de -7 m Gal et un maximum de 23 m Gal.

La couleur bleu sur la palette de couleur indique les faibles valeurs de la Anomalie entre -7 et 1 mGal dans la fossé de morsott et aïn zarga.

Les valeurs maximum et indiquée par la couleur rouge entre 14 et 23 mGal situées dans Dj BouKhadra.
 Les couleurs jaune +vert correspondant aux valeurs intermédiaires d'Anomalie entre 2 et 13 mGal situées entre Dj Def et Dj Boudjaber.
 Les valeurs varient entre 5 et 21 mGal. Se trouvent dans la région de l'anomalie résiduelle positive.
 La région d'Oum sbaa située dans la zone intermédiaire de l'anomalie résiduelle.
 La région d'El Fedj située dans la zone maximale de l'anomalie résiduelle.

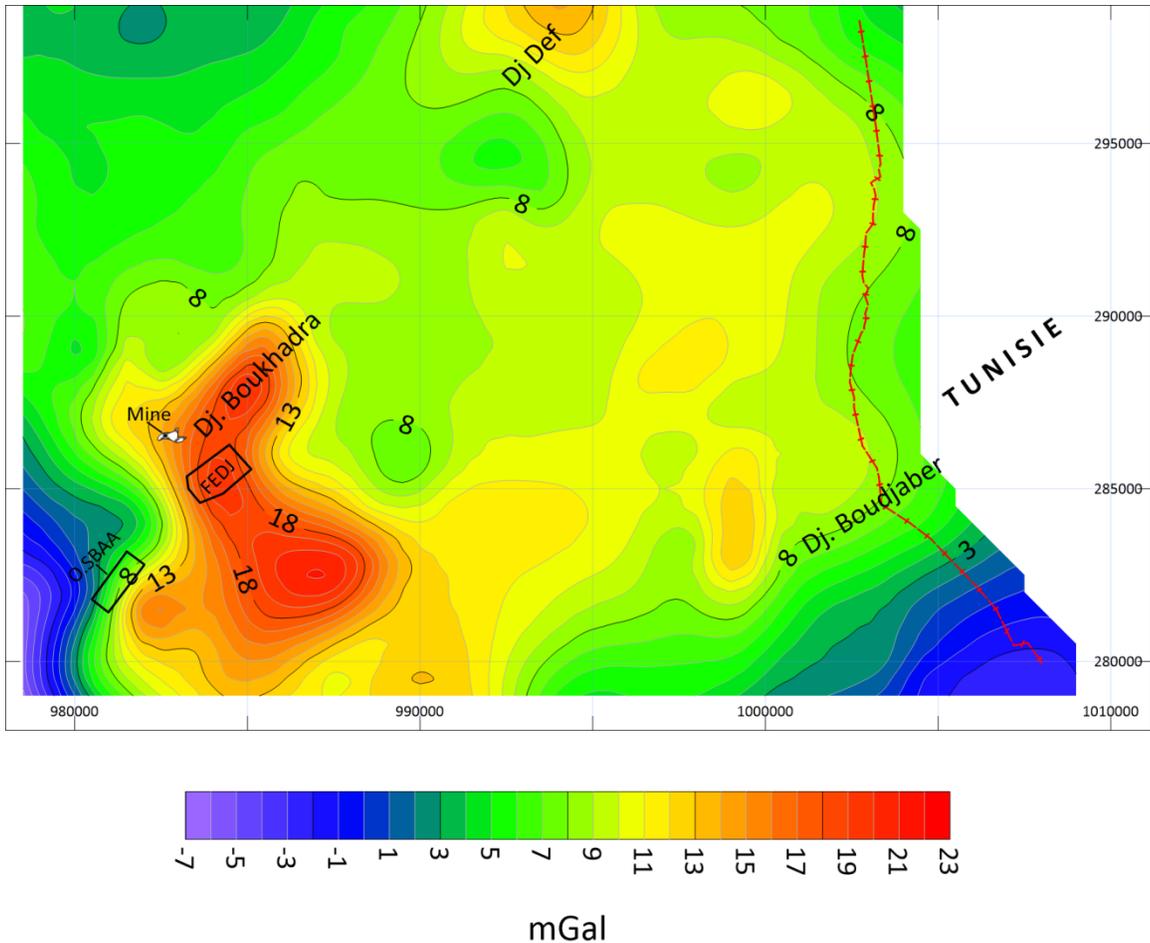


Figure II-2: Carte de l'Anomalie de résiduelle de la région de Bou Khadra, les deux cadres indiquent la région d'étude.

I. ETUDE GEOPHYSIQUE D'EL FEDJ

A. Le levé de profillement symétrique (El Fedj)

Le levé électrique sur le secteur El Fedj a été réalisé avec le dispositif symétrique : (AB=200, MN=40m, pas=20m), (10 profils de p1 à p10).

On a mesuré 2 paramètres : résistivité+chargeabilité.

Le paramètre de chargeabilité n'a pas pu être mesuré à cause du signal à été faible.

Les valeurs de résistivité apparente varient entre un minimum de 10 Ω .m et un maximum de 310 Ω .m

La couleur bleu sur la palette de couleur indique les faibles valeurs de résistivité et correspond les marnes.

Les valeurs maximum et indique par le couleur rouge et correspond des calcaires durs.

Les couleurs jaune +vert correspondant aux valeurs intermédiaires des résistivités et correspond d'un contacte marne-calcaire minéralisée.

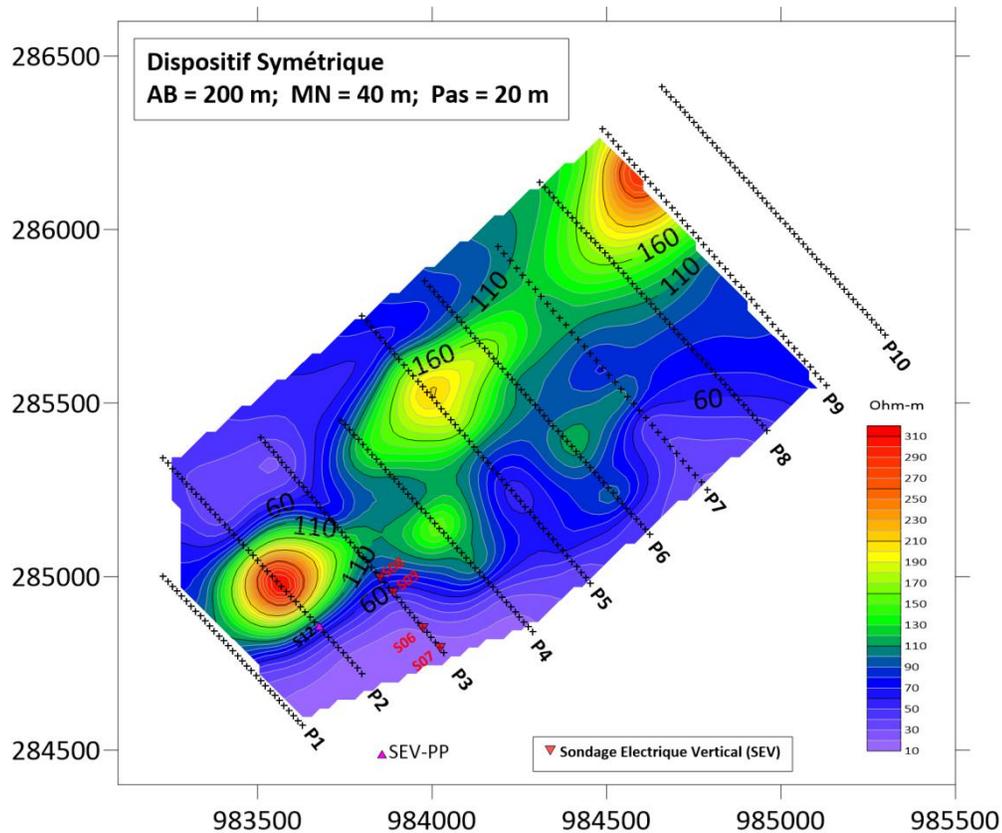


Figure I-1 : carte de résistivité du dispositif symétrique d'El Fedj.

B. Le levé électrique gradient Moyen (GM-PP) d'El Fedj

Le levé électrique sur le secteur El Fedj a été réalisé avec le dispositif gradient : (AB=900 , MN=40m , pas=20m), (10 profils de 1 à 10)

On a mesuré 2 paramètres : résistivité+chargeabilité.

Le paramètre de chargeabilité n'a pas pu être mesuré à cause du signal à été faible.

Les valeurs de résistivité apparente varient entre un minimum de 5 Ω .m et un maximum de 445 Ω .m

La couleur bleu sur la palette de couleur indique les faibles valeurs de résistivité, correspond les marnes. Les valeurs maximum et indique par le couleur rouge, correspond des calcaires durs. Les couleurs jaune +vert correspondant aux valeurs intermédiaires des résistivités, correspond d'un contact marne-calcaire minéralisée.

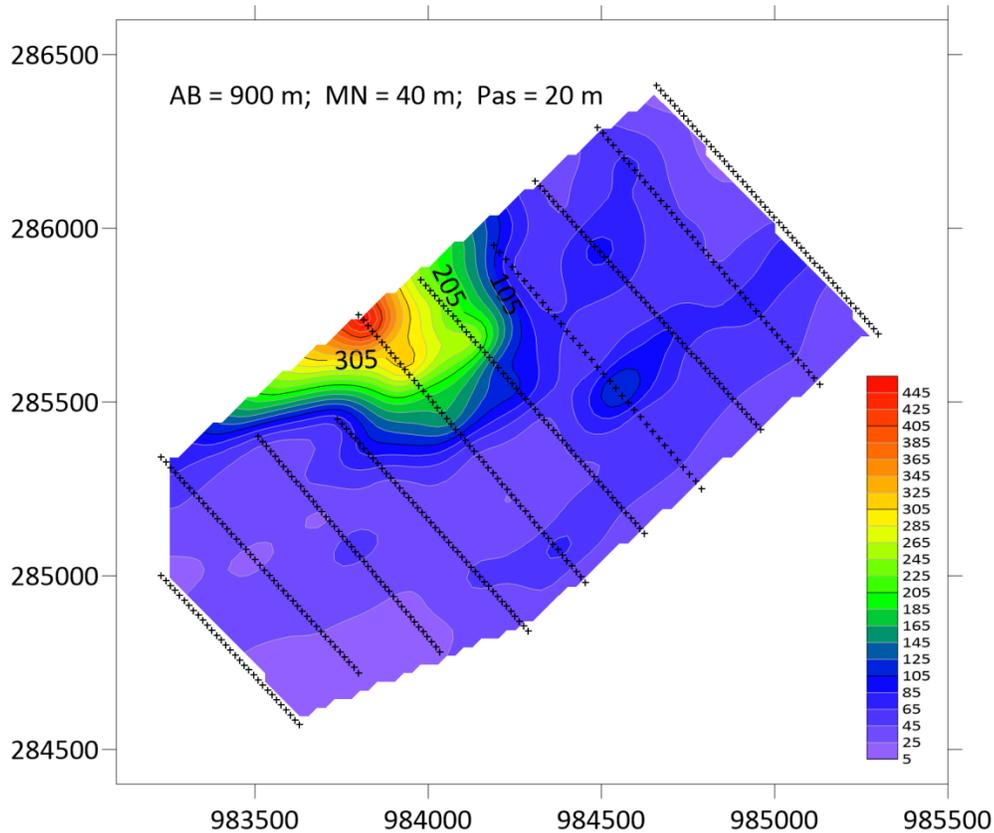
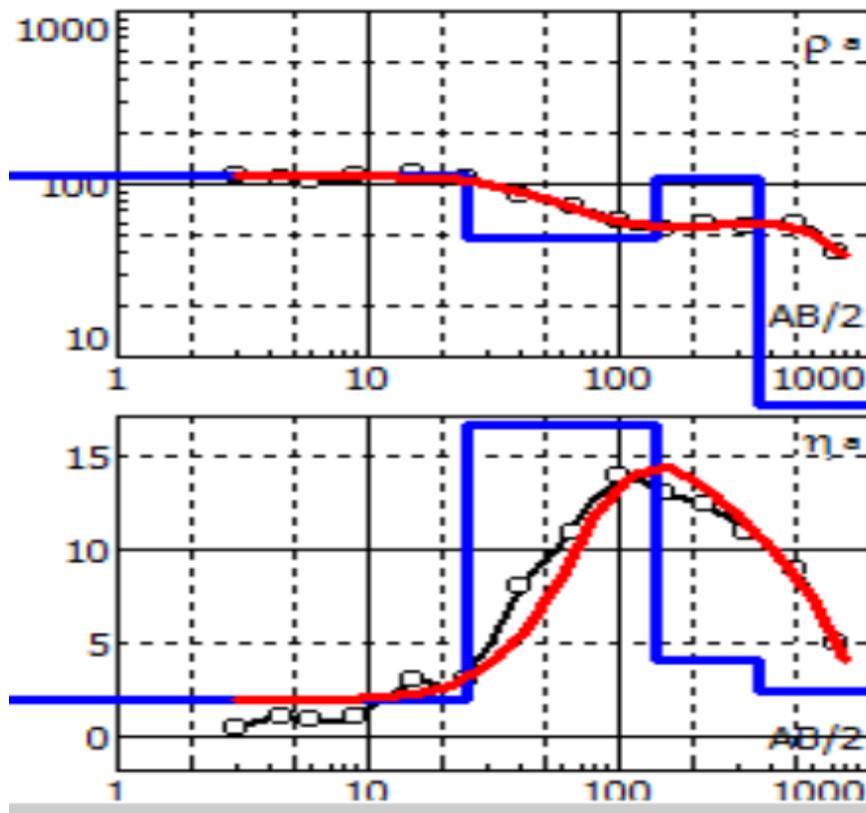


Figure I-2: carte de resistivite du dispositif gradient d'El Fedj

C. Le sondage electrique verticaux-polarisation provoquee El Fedj

Le SEV-PP 12 à été réalisé sur le profile 2 piquet 10, La (figure III-3) représente 2 paramètres. En haut, on a le paramètre résistivité qui est représentée en coordonnées bi-log. En bas, on a le paramètre de polarisation provoquée (chargeabilité) qui est représentée en coordonnées semi-log ($\frac{AB}{2} \log$).

Il à permis de mettre en évidence une couche chargeable qui a pour résistivité 48 $\Omega.m$ et une chargeabilité de 17 mV/V. Cette couche peut correspondre à des calcaires minéralisés.



	ρ	η	h
1	112	2	25
2	48	17	118
3	106	4	217
4	1	2	-

FigureI-3 : coupe de sondage électrique vertical PP El Fedj

D. Le profilé électrique combiné (PEC-PP) El Fedj

Le profilé électrique combiné à l'image du profile 9 du site El Fedj a donné de bon résultats en matière de chargeabilité, La couche chargable (minéralisée) semble être liée au contact marnes-calcaires. Elle à des chargeabilités qui peuvent atteindre 18 MV/V, probablement c'est une minéralisation polymétallique, D'après le graphe du PEC le pendage est sud-est.

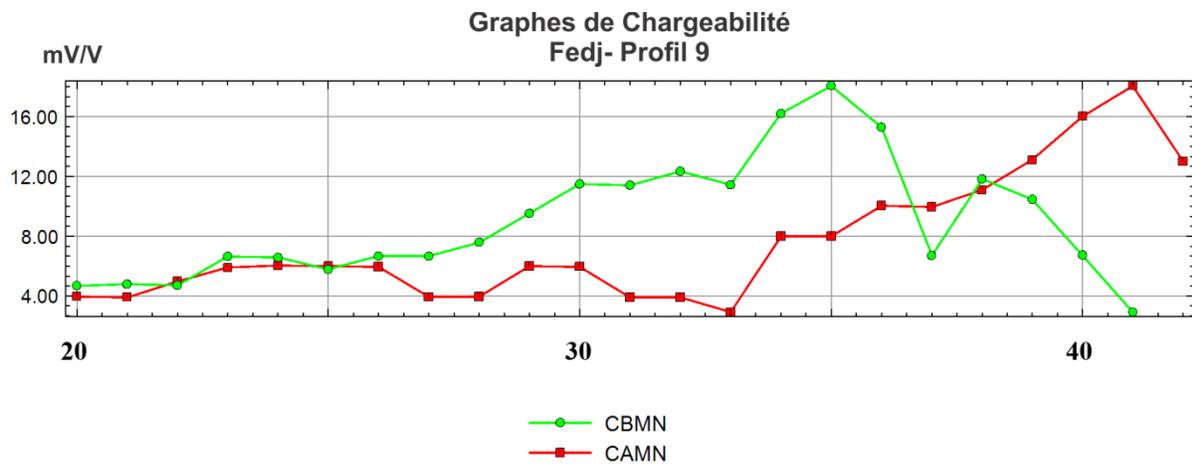


Figure I-4 : coupe de profillement électrique combiné (PEC-PP) El Fedj.

II. ETUDE GEOPHYSIQUE D'OUM SBAA

A. Le levé de profillement symétrique (PES) d'Oum Sbaa

Le levé électrique sur le secteur El Fedj à été réalisé avec le dispositif symétrique : (AB=200. MN=40m. pas= 20m). (8 profile de 1 à 8 et des 4 profils détails de l'order 3 bis-4 bis-5 bis- 6bis).

On a mesuré 2 paramètres : résistivité+chargeabilité.

Le paramètre de chargeabilité n'a pas pu être mesuré a cause de le signal à été faible.

Les valeurs de résistivité apparente varient entre un minimum de 6 Ω .m et un maximum de 27 Ω .m

La couleur bleu sur la palette de couleur indique les faibles valeurs de résistivité, correspond les marnes.

Les maximum valeurs et indique par le couleur rouge correspond des calcaires dures.

Les couleurs jaune +vert correspondant aux valeurs intermédiaires des resistivité indique un contacte marne-calcaire minéralisée.

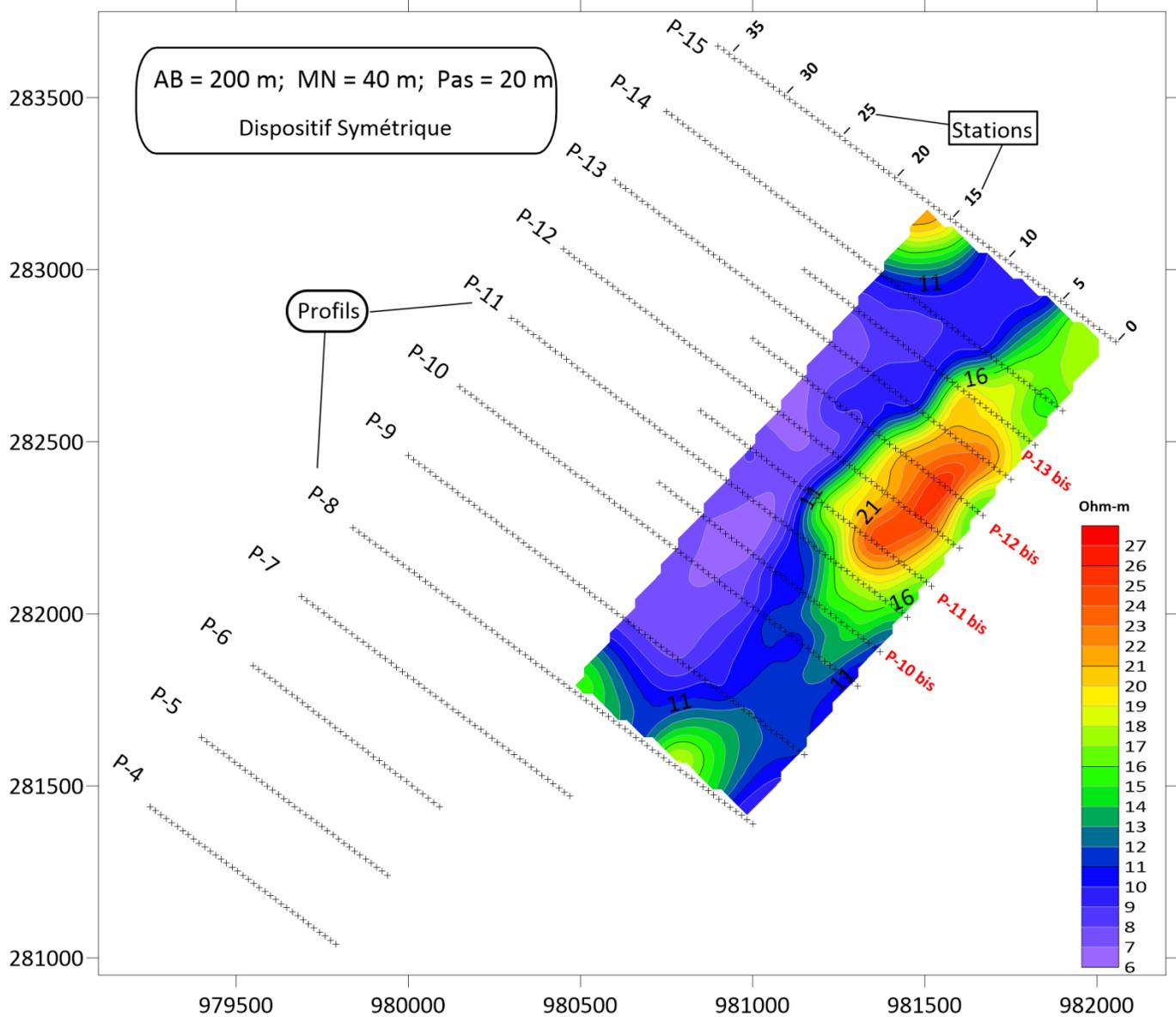


Figure II-1 : carte de resistivite du dispositif symétrique d'Oum Sbaa.

B. Le leve de électrique gradient Moyen (GM-PP) d'Oum Sbaa

Le levé électrique (GM-PP) sur le secteur Oum Sbaa à été réalisé avec le dispositif gradient : (AB=600. MN=40 m, pas = 20m). (15 profils, numerotés de 1 à 15 et 4 profils de déta ils, numerotés 10 bis, 11 bis, 12 bis et 13 bis).

On a mesuré 2 paramètres : résistivité+chargeabilité.

Le paramètre de chargeabilité n'a pas pu être mesuré a cause de la faiblesse du signal.

Les valeurs de résistivité apparente varient entre un minimum de 5 $\Omega.m$ et un maximum de plus de 95 $\Omega.m$

La couleur bleu sur la palette de couleur indique les faibles valeurs de résistivité, correspond les marnes.

Les valeurs maximum sont indiquées par la couleur rouge, correspond les calcaires altéré

Les couleurs jaune +vert correspondant aux valeurs intermediares des resistivités, correspond d'un contact marne-calcaire minéralisée.

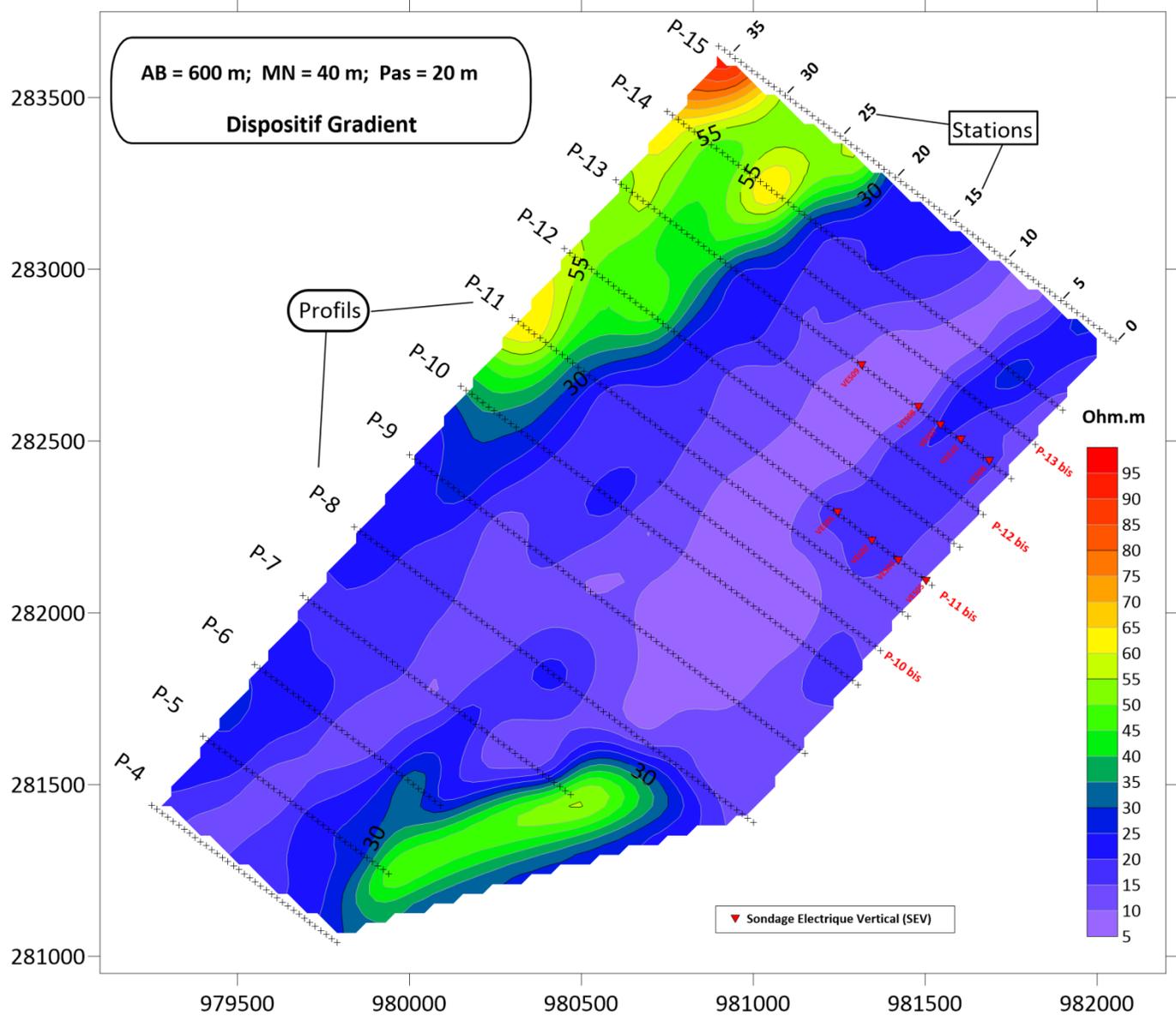


Figure II-2: Carte de résistivité du dispositif gradient d'Oum Sbaa.

C. Le sondage électrique vertical-polarisation provoquée d'Oum Sbaa

Le SEV-PP 02 à été réalisé sur le profile 13 piquet 09, La (figure I-8) représente 2 paramètres

En haut, on a le paramètre résistivité qui est représentée en coordonnées bi-log.

En bas, on a le paramètre de polarisation provoquée (chargeabilité) qui est représentée en coordonnées semi-log ($\frac{AB}{2} \log$).

Il à permis de mettre en évidence deux couches chargeables : les couches 2 et 3:

La deuxième couche qui a pour résistivité 14 $\Omega.m$ et une chargeabilité de 18 mV/V et d'épaisseur de 33m.

Cette couche peut correspondre à des calcaires minéralisés altérés.

Le troisième couche qui a pour résistivité 90 $\Omega.m$ et une chargeabilité de 14 mV/V et d'épaisseur 79 m.

Cette couche peut correspondre à des calcaires minéralisés.

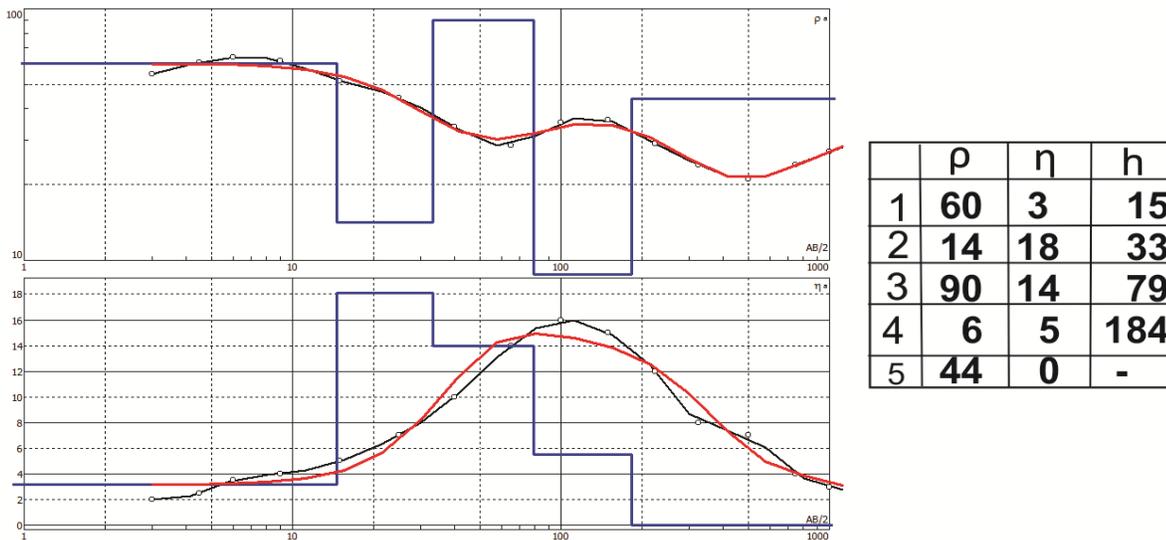


Figure II-3: coupe de sondage électrique vertical PP Oum Sbaa

D. Le profilé électrique combiné (PEC-Res) Oum Sbaa

Le PEC Res du site Oum Sbaa a donnée de bons résultats en effet, il a permis de précisés le sens du pendage de la couche calcaire. D'après la figure (IV-4) du Pec du profile 10, le pendage est de direction sud-est, car, la résistivité du RBMN dépasse celle du RAMN au début de profile.

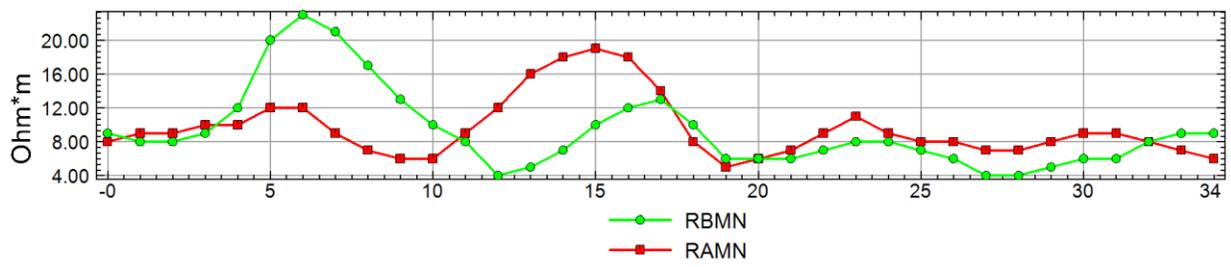


Figure II-4: Le profillement électrique combiné (PEC-Res) Oum Sbaa.

CONCLUSION GENERAL ET RECOMENDATIONS

A l'issue des travaux de prospection électrique effectués sur les secteurs El Fedj et Oum Sbaa, on tire les conclusions suivantes :

- Grace au concours des méthodes électriques, nous avons pu délimiter les surfaces de développement des calcaires de l'Aptien supérieur. Les calcaires sont caractérisés par les maximums de résistivité. Les valeurs minimales de la résistivité indiquent les accidents tectoniques.

- Les zones perspectives sont constituées essentiellement de calcaires de l'Aptien et du contact Aptien-Trias. (Secteur El Fedj).

- La zone perspective est constituée essentiellement de calcaires de l'Aptien. (Secteur Oum Sbaa).

- Le dispositif gradient est rapide et rentable avec lequel on peut couvrir de grandes surfaces de prospection. Son inconvénient, est qu'il est très influencé par les bruits surtout dans un contexte géologique similaire à celui de la zone d'étude. Ce dispositif a aussi une mauvaise résolution verticale.

- Le dispositif qui assure un bon enregistrement de l'effet PP est celui du Quadripôle Symétrique (Schlumberger), il a un bon rapport signal sur bruit. Ce dispositif a aussi son inconvénient puisqu'il est très lourd et trop lent.

- Le dispositif double tripole (Profilement combiné) est très efficace en cartographie géologique et dans la polarisation des couches.

- Si des travailleurs ultérieurs seraient projetés sur ces secteurs, nous conseillons de faire un levé PP dans la modification dipole-dipole.

- Il faut faire des sondages carottés pour savoir le contenu minéralogique dans les deux secteurs.

- Exploitation des minéraux rares trouvés dans les deux secteurs.

- Ne pas installer les constructions dans les deux secteurs parce qu'ils seront des zones d'exploitation minière.

BIBLIOGRAPHIE

- Abdul Samad, F. (2017). Polarisation provoquée: Expérimentation, modélisation et applications géophysiques (Doctoral dissertation, Paris 6).
- Anecchione, M. A. (2000). La contribution de la gravimétrie à l'étude hydrogéologique de la moraine Oak Ridges. École Polytechnique de Montréal.
- Baranov, V. (1954). Sur une méthode analytique de calcul de l'anomalie régionale. *Geophysical Prospecting*, 2(3), 203-226.
- Baranov, V. (1957). A new method for interpretation of aeromagnetic maps: pseudo-gravimetric anomalies. *Geophysics*, 22(2), 359-382.
- Belhia, A. (1990). Contribution à l'étude géophysique de la région de Saïda (Algérie): structure et minéralisation (Doctoral dissertation, éditeur non identifié).
- Blakely, P., & McDonald, B. R. (1995). Acute renal failure due to acetaminophen ingestion: a case report and review of the literature. *Journal of the American Society of Nephrology*, 6(1), 48-53.
- Bruel, R., Girardclos, S., Marchetto, A., Kremer, K., Crouzet, C., Reyss, J. L., ... & Perga, M. E. (2021). Reframing Lake Geneva ecological trajectory in a context of multiple but asynchronous pressures. *Journal of Paleolimnology*, 65(3), 353-368.
- Chapellier, D. (2000). Prospection électrique de surface. cours oneline de géophysique de l'Université de Lausanne, Suisse.
- Chelidze, T. L., & Gueguen, Y. (1999). Electrical spectroscopy of porous rocks: a review—I. Theoretical models. *Geophysical Journal International*, 137(1), 1-15.
- Dubois, J. D. (2011). Gnose et manichéisme. *Annuaire de l'École pratique des hautes études (EPHE), Section des sciences religieuses. Résumé des conférences et travaux*, (118), 151-156.
- (G. Dubourdieu, 1952). la notice géologique feuille 151 Bou Khadra.
- Fiandaca, G., Auken, E., Christiansen, A. V., & Gazoty, A. (2012). Time-domain-induced polarization: Full-decay forward modeling and 1D laterally constrained inversion of Cole-Cole parameters. *Geophysics*, 77(3), E213-E225.
- Florsch, N., & Muhlach, F. (2018). *Géophysique appliquée pour tous 1: Méthodes électriques (Vol. 1)*. ISTE Group.
- Florsch, N., Camerlynck, C., & Revil, A. (2012). Direct estimation of the distribution of relaxation times from induced-polarization spectra using a Fourier transform analysis. *Near Surface Geophysics*, 10(6), 517-531.
- FLORSCH, Nicolas et MUHLACH, Frédéric. *Géophysique appliquée pour tous 1: Méthodes électriques*. ISTE Group, 2018.
- Gazoty, A., Fiandaca, G., Pedersen, J., Auken, E., & Christiansen, A. V. (2012). Mapping of landfills using time-domain spectral induced polarization data: the Eskelund case study. *Near Surface Geophysics*, 10(6), 575-586.
- Glover, P. W. J. (2015). 11.04—Geophysical Properties of the Near Surface Earth: Electrical Properties. *Treatise geophys*, 89-137.
- Grant, F. S., & West, G. F. (1965). *Interpretation theory in applied geophysics*. New York: McGraw-Hill.
- Günther, T., & Martin, T. (2016). Spectral two-dimensional inversion of frequency-domain induced polarization data from a mining slag heap. *Journal of Applied Geophysics*, 135, 436-448.

- Keating, P., Dumont, R. S., & Jones, A. (2013). Retraitement des données du levé gradio-gravimétrique aéroporté dans le secteur du lac Strange, SNRC 24A/8, Québec et Terre-Neuve-et-Labrador. Ressources naturelles Québec.
- Kruschwitz, S., Binley, A., Lesmes, D., & Elshenawy, A. (2010). Textural controls on low-frequency electrical spectra of porous media. *Geophysics*, 75(4), WA113-WA123.
- Ku, C. C., Telford, W. M., & Lim, S. H. (1971). The use of linear filtering in gravity problems. *Geophysics*, 36(6), 1174-1203.
- Leroy, M., Gueydan, F., & Dauteuil, O. (2008). Uplift and strength evolution of passive margins inferred from 2-D conductive modelling. *Geophysical Journal International*, 172(1), 464-476.
- Lesmes, D. P., & Frye, K. M. (2001). Influence of pore fluid chemistry on the complex conductivity and induced polarization responses of Berea sandstone. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 106(B3), 4079-4090.
- Lesmes, D. P., & Morgan, F. D. (2001). Dielectric spectroscopy of sedimentary rocks. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 106(B7), 13329-13346.
- Lesmes, D. P., & Morgan, F. D. (2001). Dielectric spectroscopy of sedimentary rocks. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 106(B7), 13329-13346.
- Loke, M. H., & Barker, R. D. (1994, June). Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections. In 56th EAEG Meeting (pp. cp-47). European Association of Geoscientists & Engineers.
- Marescot, L., Monnet, R., & Chapellier, D. (2008). Resistivity and induced polarization surveys for slope instability studies in the Swiss Alps. *Engineering Geology*, 98(1-2), 18-28.
- Marshall, D. J., & Madden, T. R. (1959). Induced polarization, a study of its causes. *Geophysics*, 24(4), 790-816.
- Marshall, D. J., & Madden, T. R. (1959). Induced polarization, a study of its causes. *Geophysics*, 24(4), 790-816.
- Marshall, D. J., & Madden, T. R. (1959). Induced polarization, a study of its causes. *Geophysics*, 24(4), 790-816.
- Merriam, J. B. (2007). Induced polarization and surface electrochemistry. *Geophysics*, 72(4), F157-F166.
- Merriam, J. B. (2007). Induced polarization and surface electrochemistry. *Geophysics*, 72(4), F157-F166.
- Mesko, A. (1965). Some notes concerning the frequency analysis for gravity interpretation. *Geophysical prospecting*, 13(3), 475-488.
- Nabighian, M. N., Grauch, V. J. S., Hansen, R. O., LaFehr, T. R., Li, Y., Peirce, J. W., ... & Ruder, M. E. (2005). The historical development of the magnetic method in exploration. *Geophysics*, 70(6), 33ND-61ND.
- Negm, N. A., Kandile, N. G., Badr, E. A., & Mohammed, M. A. (2012). Gravimetric and electrochemical evaluation of environmentally friendly nonionic corrosion inhibitors for carbon steel in 1 M HCl. *Corrosion science*, 65, 94-103.
- Nettleton, L. L. (1971). Elementary gravity and magnetics for geologists and seismologists. Society of Exploration Geophysicists.
- Okay, G., Leroy, P., Ghorbani, A., Cosenza, P., Camerlynck, C., Cabrera, J., ... & Revil, A. (2014). Spectral induced polarization of clay-sand mixtures: Experiments and modeling. *Geophysics*, 79(6), E353-E375.

ORGM.2002. Prospection des polymétaux sur les secteurs de Hammeimat et Djibissa. Rapport interne inédit.

Revil, A., & Florsch, N. (2010). Determination of permeability from spectral induced polarization in granular media. *Geophysical Journal International*, 181(3), 1480-1498.

Revil, A., & Florsch, N. (2010). Determination of permeability from spectral induced polarization in granular media. *Geophysical Journal International*, 181(3), 1480-1498.

Revil, A., & Florsch, N. (2010). Determination of permeability from spectral induced polarization in granular media. *Geophysical Journal International*, 181(3), 1480-1498.

Revil, A., Abdel Aal, G. Z., Atekwana, E. A., Mao, D., & Florsch, N. (2015). Induced polarization response of porous media with metallic particles—Part 2: Comparison with a broad database of experimental data. *Geophysics*, 80(5), D539-D552.

Schlumberger, C. (1920). Etude sur la prospection électrique du sous-sol. Gauthier-Villars.

Seigel, H. O. (1959). Mathematical formulation and type curves for induced polarization. *Geophysics*, 24(3), 547-565.

Seigel, H. O. (1959). Mathematical formulation and type curves for induced polarization. *Geophysics*, 24(3), 547-565.

Skold, M., Revil, A., & Vaudelet, P. (2011). The pH dependence of spectral induced polarization of silica sands: Experiment and modeling. *Geophysical Research Letters*, 38(12).

Skold, M., Revil, A., & Vaudelet, P. (2011). The pH dependence of spectral induced polarization of silica sands: Experiment and modeling. *Geophysical Research Letters*, 38(12).

Slater, L., Ntarlagiannis, D., & Wishart, D. (2006). On the relationship between induced polarization and surface area in metal-sand and clay-sand mixtures. *Geophysics*, 71(2), A1-A5.

Stefanescu, S., Schlumberger, C., & Schlumberger, M. (1930). Sur la distribution électrique potentielle autour d'une prise de terre ponctuelle dans un terrain à couches horizontales, homogènes et isotropes. *Journal de Physique et le Radium*, 1(4), 132-140.

Tabbagh, A., Cosenza, P., Ghorbani, A., Guérin, R., & Florsch, N. (2009). Modelling of Maxwell–Wagner induced polarisation amplitude for clayey materials. *Journal of Applied geophysics*, 67(2), 109-113.

Telford, W. M., Telford, W. M., Geldart, L. P., & Sheriff, R. E. (1990). *Applied geophysics*. Cambridge university press.

Telford, W. M., Telford, W. M., Geldart, L. P., & Sheriff, R. E. (1990). *Applied geophysics*. Cambridge university press.

Titov, K., Komarov, V., Tarasov, V., & Levitski, A. (2002). Theoretical and experimental study of time domain-induced polarization in water-saturated sands. *Journal of applied geophysics*, 50(4), 417-433.

Titov, V. S., Hornig, G., & Démoulin, P. (2002). Theory of magnetic connectivity in the solar corona. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 107(A8), SSH-3.

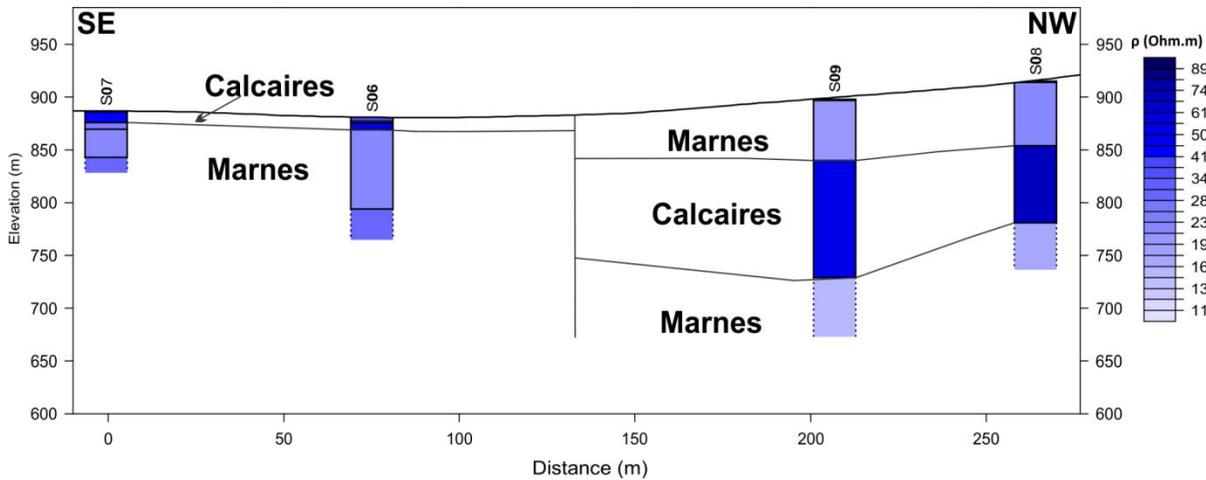
Vaudelet, P., Revil, A., Schmutz, M., Franceschi, M., & Bégassat, P. (2011). Induced polarization signatures of cations exhibiting differential sorption behaviors in saturated sands. *Water Resources Research*, 47(2).

Vinegar, H. J., & Waxman, M. H. (1984). Induced polarization of shaly sands. *Geophysics*, 49(□), 1267-1287.

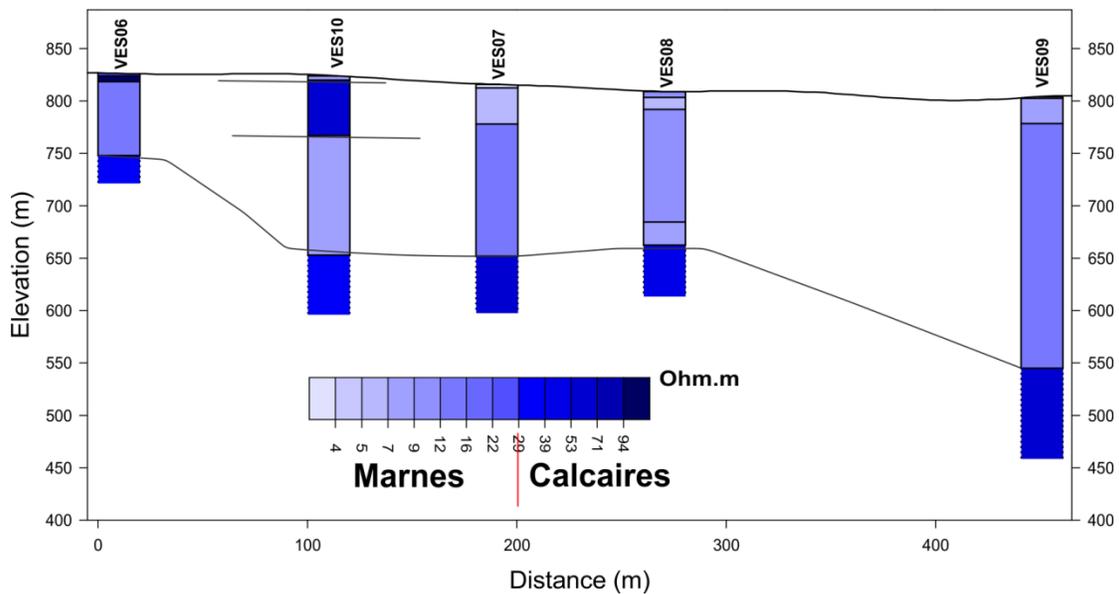
- Vinegar, H. J., & Waxman, M. H. (1984). Induced polarization of shaly sands. *Geophysics*, 49(□), 1267-1287.
- Wessel, P., & Smith, W. H. (1998). New, improved version of Generic Mapping Tools released. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 79(47), 579-579.
- Wong, J. (1979). An electrochemical model of the induced-polarization phenomenon in disseminated sulfide ores. *Geophysics*, 44(7), 1245-1265.
- Zerdazi, A. (1990). Etude gravimétrique du mole d'Ain-M'lila et de l'Atlas saharien septentrional oriental (nord-est de l'Algérie) (Doctoral dissertation, Université de Lausanne, Faculté des sciences).
- Zhang, Y., Yu, Q., Chen, X., & Zhang, B. (2022). Enhancement of near-field subwavelength focusing using a solid immersion Fresnel zone plate with radially polarized incidence. *International Journal of Modern Physics C*, 2250088.

ANNEXE

La coupe géo-électrique de sondage électrique réalisée sur secteur El Fedj (Bou Khadra).



La coupe géo-électrique de sondage électrique réalisée sur secteur Oum Sbaa (Bou Khadra).

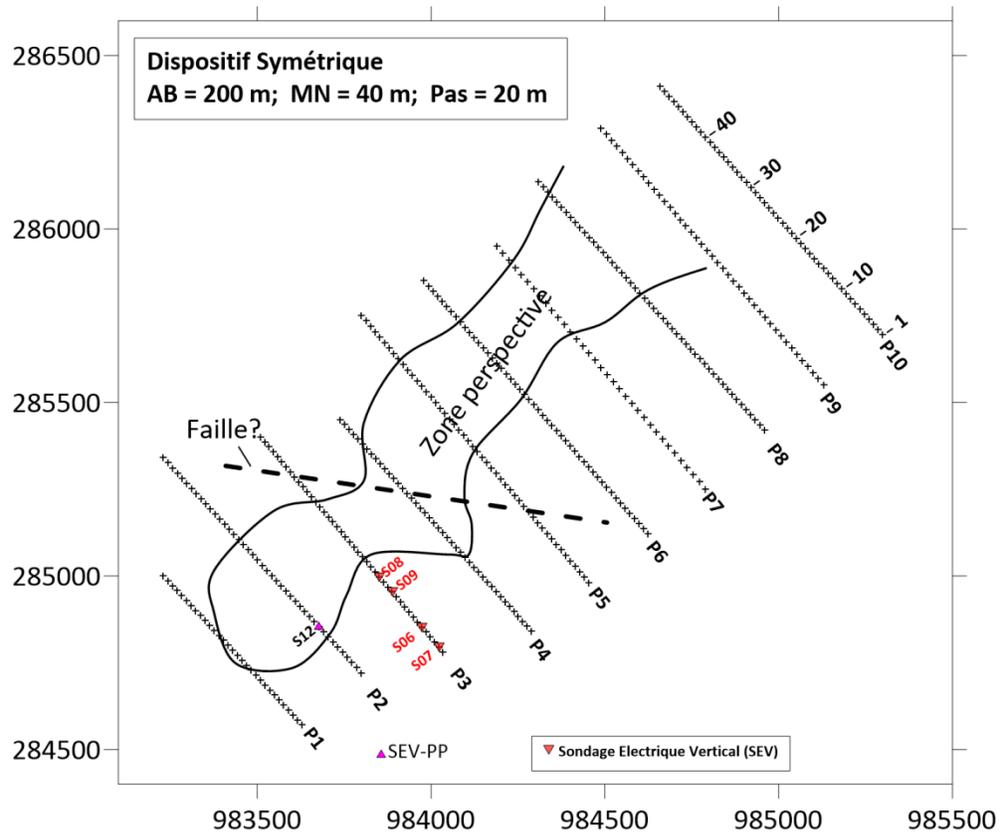


La zone perspective d'El Fedj

La zone perspective d'El Fedj est située entre les profils (P-1 ; P-9) englobe les stations 15 et 49.

Une faille de direction NW-SE qui passe entre les profils P2,P3,P4 et P5 est mise en évidence.

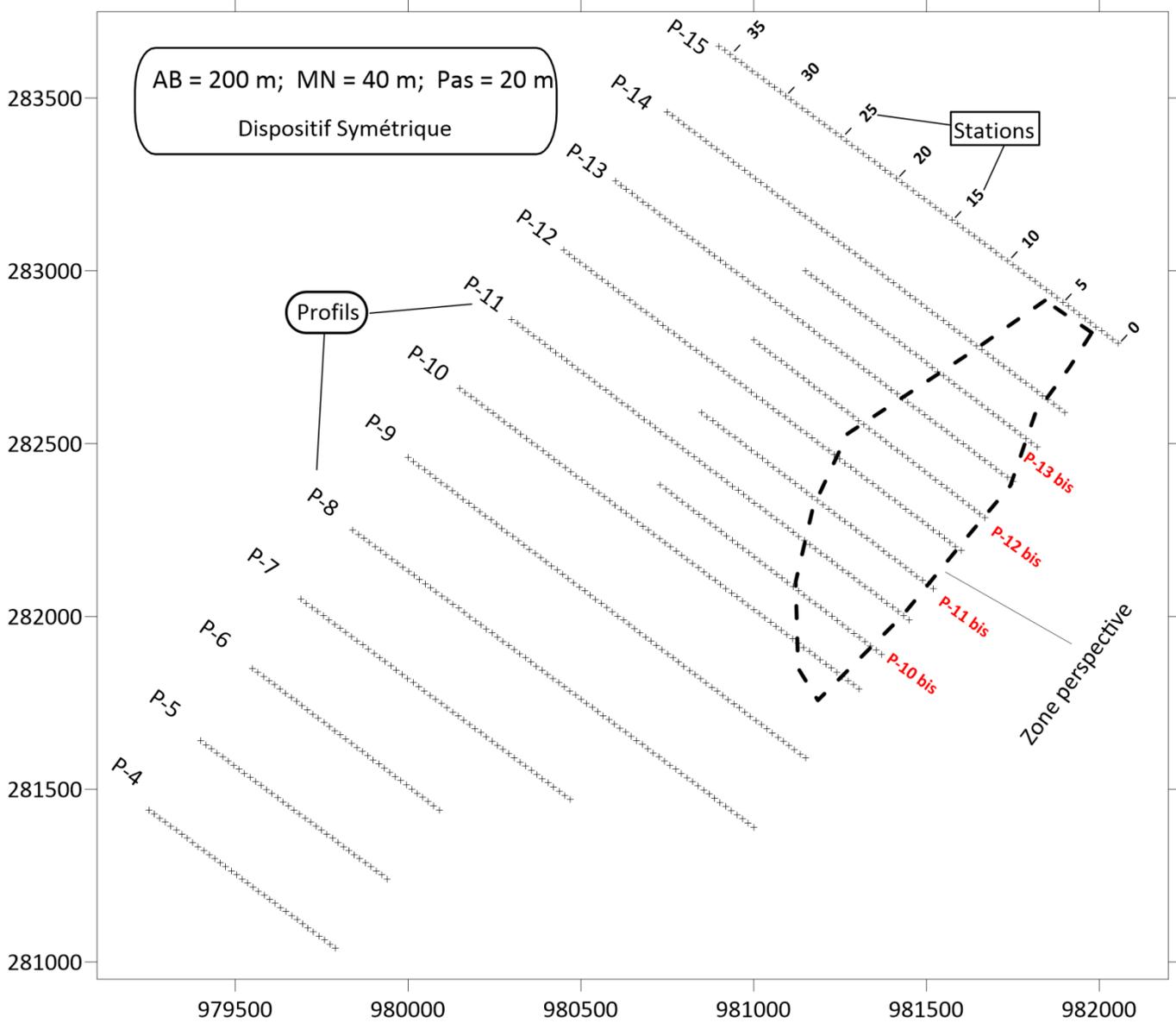
La zone perspective est constituée essentiellement de calcaires de l'Aptien et du contact Aptien-Trias.



La zone perspective d'Oum Sbaa

La zone perspective d'Oum Sbaa situé les profils (P-10 ; p-15), et englobe dans entre la station 0 et 10.

La zone perspective est constituée essentiellement de calcaires de l'Aptien.



Le profillement électrique combine avec une courbe de pendage

Graphes de Chargeabilité Fedj- Profil 9

